

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль Электрооборудование летательных аппаратов

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы:

«Вторичная бортовая система электропитания на основе трансформатора Скотта»

УДК 621.314.58

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Мандригеля Григорий Евгеньевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А. Г.	д.т.н., профессор		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Л. Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И. Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения/НОЦ/ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютеева П.В.	к.т.н., доцент		

Результаты обучения по направлению
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

P1	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
P2	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
P3	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
P4	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
P5	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
P6	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
P7	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
P8	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
P9	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
P10	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
P11	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
P12	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Отделение Электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:
Руководитель ООП

(Подпись) (Дата) Тютеева П.В.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Мандригеля Григорию Евгеньевичу

Тема работы:

Вторичная бортовая система электропитания на основе трансформатора Скотта	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Напряжение первичной сети: 27 В Выходное напряжение на нагрузке: 3ф,36 В Мощность нагрузки: 800 Вт Требуемое значение КПД: 95 % Требуемое значение коэффициента гармоник выходного напряжения: не более 0,05
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	1. Обзор используемых преобразователей 2. Описание работы схемы Скотта 3. Расчет элементов схемы 4. Моделирование 5. Финансовый менеджмент 6. Социальная ответственность 7. Заключение.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Спицына Любовь Юрьевна
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	11.01.20
---	-----------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А.Г.	Д.т.н., профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Мандригеля Григорий Евгеньевич		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Мандригеля Григорию Евгеньевичу

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника/Электрооборудование летательных аппаратов

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта не более 400 тыс.руб Оклад НР – 26500 руб. Оклад инженера проектировщика – 17000 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизации – 20% Районный коэффициент – 30% Значение показателя интегральной ресурсоэффективности проекта не менее 4,1 баллов
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные страховые фонды – 30%

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Планирование работ и их временных оценок
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Смета затрат на проектирование
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Сравнительный анализ полученных результатов

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Спицына Любовь Юрьевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Мандригеля Григорий Евгеньевич		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6Н	Мандригеля Григорий Евгеньевич

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника/ Электрооборудование летательных аппаратов

Тема ВКР:

Вторичная бортовая система электропитания на основе трансформатора Скотта	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	<p><i>Главным объектом исследования является трехфазный автономный инвертор напряжения по схеме Скотта. Область применения – вторичная бортовая система питания в качестве преобразователя постоянного тока в переменный.</i></p>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p><i>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)</i> <i>ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования</i> <i>ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны»</i> <i>Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 №1110 (с изменениями от 24.12. 2014) «Об организации сбора, вывоза, утилизации, и переработки бытовых и промышленных отходов на территории муниципального образования «Город Томск»</i></p>
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p><i>- Отклонение показателей микроклимата;</i> <i>- Превышение уровня шума;</i> <i>- Отсутствие или недостаток</i></p>

	<p><i>естественного освещения;</i></p> <p>- <i>Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека</i></p>
3. Экологическая безопасность:	<p>- <i>Воздействие на атмосферу обуславливается выбросами механического цеха;</i></p> <p>- <i>Воздействие на гидросферу обусловлено возможными сбросами;</i></p> <p>- <i>Воздействие на литосферу обусловлено твердыми отходами цеха в процессе производства.</i></p>
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	<p><i>Возможные ЧС на рассматриваемом производстве: электропоражение, пожары. Наиболее типичный вид ЧС: пожар</i></p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

—
Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6Н	Мандригеля Григорий Евгеньевич		

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 81 страниц, 24 рисунков, 18 таблиц, 23 источников.

Ключевые слова: вторичная энергосистема переменного тока, авиационный преобразователь, трехфазный автономный инвертор напряжения, трансформаторная схема Скотта, широтно-импульсная модуляция.

В качестве объекта исследования выступает трехфазный автономный инвертор напряжения по схеме Скотта.

Целью работы является проектирования трехфазного автономного инвертора на основе трансформаторной схемы Скотта, выбор полупроводниковых приборов, подбор материала для магнитопровода трансформатора. Осуществить моделирование преобразователя в MatLab Simulink и проверочное моделирование в Multisim. Рассчитать затраты НТИ и провести анализ вредных и опасных факторов в производственном помещении.

Для достижения поставленных целей решаются следующие задачи:

- расчет элементов схемы,
- анализ современных материалов для магнитопровода и проводов обмоток,
- разработка имитационной модели.

В процессе проектирования проводились расчеты в программном пакете MathCad 15, Разработка графических материалов в программе Microsoft Visio 2016, создание имитационной модели в MatLab Simulink R2017b и Multisim 13.0.

В результате работы были получены параметры инверторов и трансформаторов, выбран материал магнитопровода, и результаты эксперимента с имитационной моделью.

Степень внедрения: ВКР выполнена по заданию института силовой электроники НГТУ, г. Новосибирск и ОЭЭ ТПУ, г. Томск.

Оглавление	
Список принятых сокращений.....	11
Введение.....	12
1 Вторичная энергосистема переменного тока на летательных аппаратах	14
2 Анализ преобразователей постоянного тока в переменный.....	15
2.1 Электромашинные преобразователи.....	15
2.2 Статические преобразователи	16
3 Варианты решений. Описание схемы Скотта	18
4 Функциональная схема автономного трехфазного инвертора по схеме Скотта	21
5 Расчет силовой части	23
5.1 Техническое задание для расчета.....	23
5.2 Расчет трансформатора Тр2	23
5.3 Расчет трансформатора Тр1	26
5.4 Расчет АИН1	29
5.5 Расчет АИН2.....	32
5.6 Расчет выходного LC – фильтра.....	34
6 Система управления.....	35
7 Система защиты	38
8 Моделирование преобразователя	40
9 Моделирование в Multisim	46
10 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 50	
10.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	50
10.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования	50
10.1.2 Анализ конкурентных технических решений.....	51
10.1.3 QuaD-анализ	53
10.1.4 SWOT-анализ	54
10.2 Планирование научно-исследовательских работ	58
10.2.1 Смета затрат на проект.....	61
10.2.2 Материальные затраты	61
10.2.3 Амортизация компьютерной техники	61
10.2.4 Основная заработная плата исполнителей	62

10.2.5 Отчисления во внебюджетные фонды.....	63
10.2.6 Прочие затраты	63
10.2.7 Накладные расходы	64
10.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	65
11 Социальная ответственность	67
11.1 Введение.....	67
11.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	68
11.3 Производственная безопасность	69
11.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	69
11.4.1 Отклонение показателей микроклимата.....	69
11.4.2 Превышение уровня шума	70
11.4.3 Недостаток естественного света.....	71
11.4.4 Повышенное значение напряжения установок.....	72
11.5 Экологическая безопасность.....	75
11.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	76
Заключение	78
Список использованных источников	80

Список принятых сокращений

ЛА – летательный аппарат;

АИН – автономный инвертор напряжения;

Тр – трансформатор;

ТТ – трансформатор тока;

ПО – преобразователь однофазный;

ПТ – преобразователь трехфазный;

ПОС – преобразователь однофазный статический;

ПТС – преобразователь трехфазный статический;

КПД – коэффициент полезного действия;

ЭДС – электродвижущая сила;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

Введение

Бортовая система электроснабжения летательных аппаратов предназначена для обеспечения бортового оборудования ЛА электрической энергией требуемого качества. В настоящее время для питания оборудования ЛА применяется электроэнергия постоянного тока 27 В, переменного однофазного или трехфазного тока напряжением 200/115 В на частоте 400 Гц на всех этапах полета и режима эксплуатации самолета. Внутри системы энергия трансформируется различными преобразователями

Авиационные преобразователи электрической энергии являются вторичными источниками электрического тока. Они преобразуют электрическую энергию с данными параметрами в электрическую же энергию, но с другими параметрами. Параметрами электрической энергии, подвергающимися преобразованию, могут быть род тока, уровень напряжения, частота тока, число фаз и т. п. Один преобразователь может изменять один или несколько параметров электрической энергии. На летательных аппаратах преобразователи применяются для питания отдельных групп потребителей, требующих для своего функционирования параметры электрической энергии, отличные от тех, которые выдают основные (первичные) источники, т. е. генераторы. Преобразователи могут применяться также в качестве резервных источников электрической энергии.

Согласно [1], первичные и вторичные источники переменного тока должны обеспечивать установившиеся нормальные рабочие характеристики переменного тока постоянной частоты 400 Гц при:

- небалансе нагрузок фаз до 15 % номинальной мощности фазы;
- импульсно-периодической составляющей нагрузки с $\cos \varphi = 0,95$ и импульсом тока до 7 % номинального значения тока фазы;
- трехфазной двухполупериодной трансформаторно-выпрямительной нагрузке до 25 % номинальной мощности источника переменного тока при вторичной системе 27 В.

Главной задачей любых преобразователей в системе электроснабжения ЛА - обеспечение потребителя энергией требуемого качества. На данный момент большинство устройств, используемых в качестве преобразователей постоянного тока в переменный, не способны работать стабильно в современных условиях полета. Как и всегда инженерная задача стоит в создании максимально адаптированного устройства, легкого, стабильного, долговечного, с высокими энергетическими показателями.

В выпускной квалификационной работе проектируется полупроводниковый преобразователь постоянного тока в переменный – трехфазный автономный инвертор по схеме Скотта.

1 Вторичная энергосистема переменного тока на летательных аппаратах

На летательных аппаратах кроме первичной энергосистемы постоянного тока напряжением 27 В применяются также вторичные энергосистемы однофазного и трехфазного переменного тока постоянной частоты 400 Гц.

В рамках ВКР рассматривается трехфазная система переменного тока, которая может применяться [2] для питания маломощных потребителей, таких как: пилотажно-навигационные системы, системы автоматического управления, следящие системы, приборов различных видов и др. В качестве источников энергии в этих системах применяются преобразователи постоянного тока в трехфазный переменный ток постоянной частоты. Такие преобразователи могут питать как отдельных потребителей, так и группу потребителей. В частности, при возникновении аварийного режима работы (отказе всех основных и резервных каналов генерирования электроэнергии) преобразователь участвует в трансформации энергии постоянного тока от аккумуляторных батарей в энергию переменного тока для питания потребителей первой и второй категории.

Параллельная работа не нашла практическое применение, так как это значительно усложняет систему, увеличивает вес и снижает надежность.

На качество выходных параметров преобразователя значительное влияние оказывает стабильность входного напряжения, поэтому они должны получать питание непосредственно с распределительных шин ЦРУ первичной энергосистемы.

Согласно [1] трехфазные преобразователи должны поддерживать постоянными напряжение $36 \text{ В} \pm 3 \%$ и частоту $400 \text{ Гц} \pm 2 \%$, при этом напряжение на клеммах потребителей - $36 \text{ В} \pm 5\%$.

2 Анализ преобразователей постоянного тока в переменный

На летательных аппаратах, где основной системой электроснабжения является система постоянного тока, для получения переменного тока стабильной частоты применяются преобразователи следующих видов: электромашинные и статические. На сегодняшний момент, наиболее широкое распространение получили электромашинные преобразователи, но постепенно системы электроснабжения перестраивают на основе статических преобразователей. Рассмотрим каждый из них.

2.1 Электромашинные преобразователи

В системах электроснабжения ЛА электромашинные преобразователи постоянного тока используются как правило в качестве аварийных источников переменного тока постоянной частоты для питания потребителей 1-й категории.

[3] Конструктивно электромашинный преобразователь представляет собой совокупность электромашинного агрегата и коробки с элементами систем регулирования, управления и защиты. Электромашинный агрегат состоит из соединенных на одном валу электродвигателя постоянного тока и одного или двух синхронных генераторов.

Этот тип преобразователей чаще всего выполняются как двигатель-генераторные агрегаты. Агрегат состоит из двигателя постоянного тока и генератора (или генераторов) переменного тока, размещенных в одном корпусе на общем валу. Магнитные и электрические цепи отдельных машин независимы. Двигатель преобразователя имеет последовательное или смешанное возбуждение. Генераторы возбуждаются от бортовой сети постоянного тока. Генераторы маломощных преобразователей возбуждаются от постоянных магнитов. В процессе запуска двигателя в зависимости от мощности преобразователя пусковые токи могут достигать сотен ампер, что вызывает резкое понижение напряжения в сети.

В настоящее время наибольшее распространение получили однофазные электромашинные преобразователи типа ПО напряжением 115 В, трехфазные типа ПТ с линейным напряжением 36 и 200 В. Мощность таких преобразователей лежит в пределах от 125 до 6000 ВА.

Главными недостатками таких преобразователей являются:

- невысокая надежность за счет наличия контактных колец, коллекторного узла;
- сравнительно низкий КПД в пределах 0,4-0,5%;
- большая масса;
- возможна неустойчивая работа преобразователя;
- небольшой срок службы.

2.2 Статические преобразователи

Статические преобразователи представляют собой полупроводниковые преобразователи постоянного напряжения 27 В в переменный однофазный ток напряжением 115 В, частотой 400 Гц или в переменный трехфазный ток с линейным напряжением 36 В частотой 400 Гц [3]. В системах электроснабжения, где первичная система является системой постоянного тока, преобразователь служит для получения переменного тока, а в системах переменного тока преобразователь используется как аварийный источник переменного тока при отказе основной системы электроснабжения.

Статические преобразователи напряжения выполняются на основе однофазных и трехфазных автономных инверторов напряжения. Благодаря достижениям в области силовой электроники были созданы надежные и достаточно мощные преобразователи, превосходящие по основным параметрам электромашинные преобразователи, такие как ПОС-250, ПОС-800, ПТС-500 и другие.

По сравнению с электромашинные статические преобразователи обладают следующими преимуществами:

- более высокий КПД, 0,7-0,95;

- отсутствие подвижных частей, что повышает надежность;
- массовые показатели несколько меньше;
- время выхода в рабочий режим в 5-10 раз меньше;
- в несколько раз меньше пусковые токи;
- лучшее качество переходных процессов;
- нет акустических шумов;

Основным элементом силовой части статического преобразователя постоянного тока является транзисторный или тиристорный инвертор.

Инвертор – устройство для преобразования постоянного тока в переменный с постоянным или регулируемым значением выходного напряжения и частоты. В качестве коммутационных элементов в автономных инверторах могут использоваться транзисторы и тиристоры. Первые используются в устройствах относительно небольшой мощности, вторые чаще встречаются в автономных инверторах напряжения и в регулируемых инверторах. Обычные тиристоры иногда приходится применять в совокупности со схемами принудительной коммутации.

3 Варианты решений. Описание схемы Скотта

Трехфазные автономные инверторы могут быть выполнены либо в виде трех однофазных, объединённых в одну схему посредством выходных трансформаторов (Рисунок 1), либо двух однофазных, объединенных трансформаторами по схеме Скотта (Рисунок 3), в которой выходные напряжения двух инверторов сдвинуты на 90 град, либо на основе мостовой бестрансформаторной схемы (Рисунок 2).

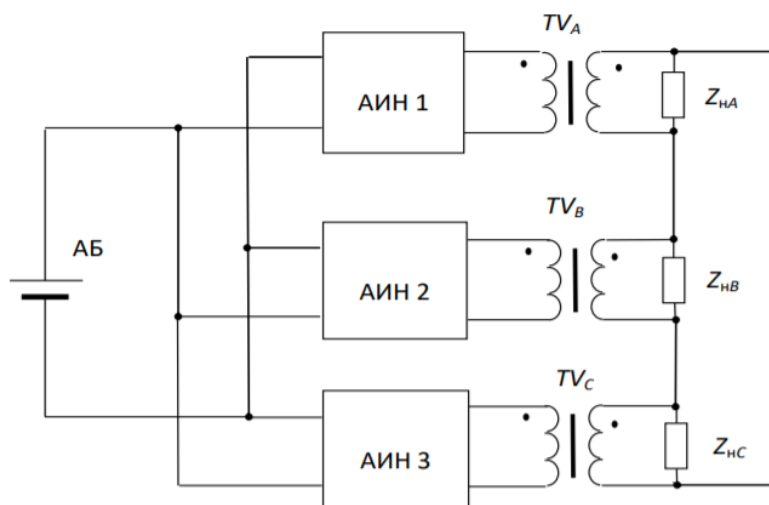


Рисунок 1 – Схема трехфазного автономного инвертора на основе трех однофазных

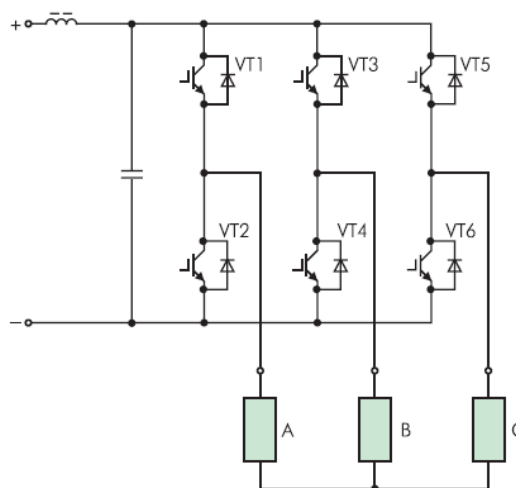


Рисунок 2 – Трехфазный мостовой инвертор

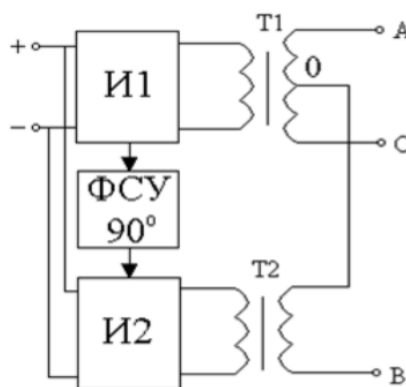


Рисунок 3 – Трехфазный инвертор по схеме Скотта

Все вышеизложенные схемы имеют право быть использованными во вторичной системе питания летательных аппаратов, однако, проведя сравнение можно выделить наиболее предпочтительную схему трехфазного инвертора.

Мостовые трехфазные инверторы применяются в том случае, когда нагрузка равномерно распределяется по фазам преобразователя. Такие инверторы просты и обладают меньшим количеством элементов, также они наиболее надежны. Однако при неравномерной нагрузке фаз на выходе преобразователя появляется несимметрия фазных напряжений, для устранения которой требуется применения дополнительных регулирующих устройств в силовой цепи, что снижает его КПД, надежность и ухудшает массогабаритные показатели по сравнению с преобразователями других типов [3].

Подобные недостатки мостовых инверторов устраняются применением схемы из трех однофазных инверторов. Симметрия фазных напряжений здесь обеспечивается относительно простыми средствами путем пофазного регулирования напряжения или соответствующего сдвига фаз за счет управления. Однако количество силовых полупроводниковых приборов в преобразователях такого типа выше, чем в схеме мостового инвертора, что значительно усложняет как саму схему, так и систему управления устройствами коммутации. Также повышается и общая стоимость

преобразователя, так хорошие, например, транзисторы, стоят достаточно дорого.

Способ формирования трехфазной системы напряжений с использованием трехфазного инвертора по схеме Скотта занимает компромиссное положение между первыми двумя способами как по сложности преобразователя, так и по его функциональным возможностям. Рассмотрим подробнее трехфазный инвертор по схеме Скотта.

Трансформаторная схема Скотта – система из двух однофазных трансформаторов, вторичные обмотки которых соединены определенным образом (Рисунок 3) [4].

В современной электротехнике и электроэнергетике система трансформаторов Скотта (ее также называют Т-схемой Скотта) применяется при питании мощных однофазных или двухфазных потребителей, или группы потребителей от трехфазной сети для минимизации, возникающей при этом токовой несимметрии.

Для применения в бортовой преобразовательной технике схема Скотта интересна возможностью создания в ней трехфазной системы фазных напряжений с силовой нейтралью.

К преимуществам высокочастотного трансформатора Скотта можно отнести возможность:

- выравнивания перекаса фазного напряжения
- повышения коэффициента использования трансформатора по сравнению с другими схемами;
- улучшения качества электроэнергии;
- симметричной работы всех фаз.

Принцип работы схемы Скотта поясняет Рисунок 4.

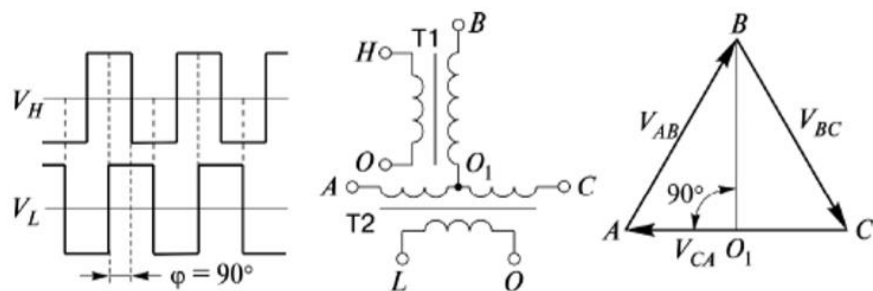


Рисунок 4 – Формирование трехфазной системы напряжений с использованием трансформаторной схемы Скотта.

Для образования выходной трехфазной системы напряжений при равенстве входных напряжений на первичных обмотках трансформаторов Т1 и Т2 основополагающим является соблюдение необходимого соотношения витков обмоток этих трансформаторов:

$$w_H = w_L; w_{AO1} = w_{OC}; w_{BO1} = \frac{\sqrt{3}(w_{AO1} + w_{OC})}{2} \quad (1)$$

4 Функциональная схема автономного трехфазного инвертора по схеме Скотта

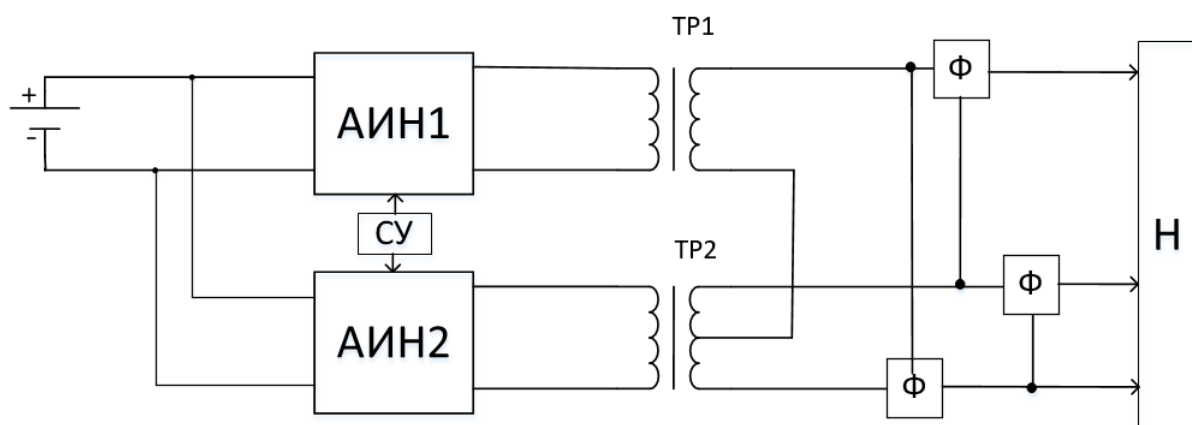


Рисунок 5 – Функциональная схема АИН по схеме Скотта.

Назначение элементов схемы:

АИН – однофазный автономный инвертор напряжения, преобразующий постоянное напряжение в переменное;

СУ – система управления инверторами;

ТР – трансформаторы, образующие схему Скотта;

Ф – фильтр для сглаживания пульсаций;

Н – нагрузка.

5 Расчет силовой части

5.1 Техническое задание для расчета

$U = 27 \text{ В}$ - напряжение питания преобразователя;

$U_n = 36 \text{ В}$ - фазное значение напряжения на нагрузке;

$P_n = 800 \text{ Вт}$ - требуемая мощность на нагрузке;

$\eta = 95 \%$ - требуемое значение КПД;

$k_T = 0,05$ - требуемое значение коэффициента гармоник выходного напряжения.

5.2 Расчет трансформатора Тр2

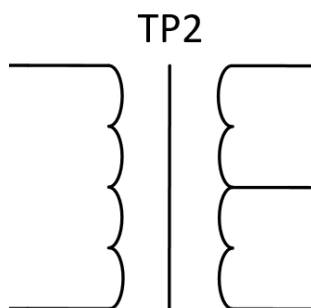


Рисунок 6 – Схема однофазного трансформатора с двумя вторичными обмотками

Расчет ведется по методике, описанной в [5].

Амплитудное значение напряжения первичной обмотки трансформатора определяется как:

$$U_{1\max} = U \cdot 0.95 = 27 \cdot 0.95 = 25,65 \text{ В} \quad (2)$$

Эффективное значение напряжения:

$$U_1 = \frac{U_{1\max}}{\sqrt{2}} = 18,14 \text{ В} \quad (3)$$

Коэффициент трансформации:

$$K_{mp1} = \frac{2U_1}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2 \cdot 18,14}{\sqrt{3} \cdot 72} = 0.291 \quad (5)$$

Ток на нагрузке определяется по выражению:

$$I_n = \frac{P_n}{U_n} = \frac{800}{72} = 11,1 \text{ A} \quad (6)$$

Ток на первичной обмотке:

$$I_1 = \frac{I_n}{K_{mp2} \cdot \eta} = \frac{11,1}{0,291 \cdot 0,95} = 40,21 \text{ A} \quad (7)$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки, приведенное к напряжению первичной обмотки трансформатора, определяется по выражению:

$$R_{экв} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{18,14}{40,21} = 0,451 \text{ Ом} \quad (8)$$

Выберем сердечник и обмотки по известным значениям тока и напряжения, при этом число витков первичной обмоток рассчитывается исходя из наибольшего напряжения, прикладываемого к ней, чтобы исключить режим насыщения сердечника трансформатора.

Габаритная мощность трансформатора определяется по следующему выражению:

$$P_T = \frac{U_{1max} \cdot I_1 + U_n \cdot I_n}{2} = \frac{25,65 \cdot 40,21 + 72 \cdot 11,1}{2} = 915,682 \text{ Вт} \quad (9)$$

Далее необходимо выбрать материал магнитопровода трансформатора. С учетом высокого развития металлургии и технологии электротехнических материалов выбираем сплав прецизионный магнитно-мягкий марки 49КФ с толщиной листа 0,2 мм.

Кроме железа, являющимся основным металлом в данном сплаве, в его состав входит около 48-49 % кобальта (Co) и различные легирующие металлы (Ni; Mn; Si). Такой состав определяет ряд особенных свойств материала, позволяющих использовать сплав марки 49КФ для сердечников высокочастотных трансформаторов, магнитов и соленоидов. В частности, данный прецизионный сплав отличается высоким значением магнитного насыщения даже в слабых магнитных полях, которой может достигать 2,35 Тл, и значительной магнитной проницаемостью при высоких показателях индукции [6].

Задаем следующие параметры из справочных данных:

$k_\phi = 1,11$ - коэффициент формы напряжения для синусоиды;

$k_c = 0,85$ - коэффициент заполнения сердечника сталью для трансформаторов, выполненных из электротехнической стали 49К2Ф

$\delta = 8 \frac{A}{мм^2}$ - плотность тока в обмотке трансформатора.

$\sigma = 0,25$ - коэффициент заполнения окна сердечника медью.

$B_m = 1,88 \text{ Тл}$ - индукция в магнитопроводе для стали 49КФ при частоте 400 Гц

$$S_o S_c = \frac{10^2 \cdot P_r}{2 \cdot f \cdot k_c \cdot k_\phi \cdot B_m \cdot \delta \cdot \sigma} = \frac{10^2 \cdot 915,682}{2 \cdot 400 \cdot 0,85 \cdot 1,11 \cdot 1,88 \cdot 8 \cdot 0,25} = 32,265 \text{ см}^4 \quad (10)$$

где S_o - площадь окна сердечника магнитопровода;

S_c - поперечное сечение сердечника.

Исходя из полученных данных выбираем сердечник ПЛ12,5х25 из стандартного ряда магнитопроводов, имеющий $S_o S_c = 37,6 \text{ см}^4$, $S_o = 12 \text{ см}^2$, $S_c = 3,13 \text{ см}^2$

Число витков на один вольт ЭДС в обмотках трансформатора определяются по выражению:

$$W_0 = \frac{10^4}{4 \cdot k_\phi \cdot B_m \cdot f \cdot S_c \cdot k_c} = \frac{10^4}{4 \cdot 1,11 \cdot 1,88 \cdot 400 \cdot 3,13 \cdot 0,85} = 1,126 \frac{\text{виток}}{\text{вольт}} \quad (11)$$

Число витков в первичной обмотке:

$$w_1 = U_{1\max} \cdot W_0 = 25,65 \cdot 1,126 = 29 \text{ витков} \quad (12)$$

Число витков во вторичной обмотке:

$$w_2 = U_n \cdot W_0 = 82 \text{ витка} \quad (13)$$

Для обеспечения выбранной плотности тока в обмотке трансформатора $\delta = 8 \frac{A}{мм^2}$ необходимо подобрать соответствующий провод с высоким значением теплопроводности. Принимаем провод с медной никелированной жилой круглого сечения с изоляцией на основе полиимидного лака ПНЭТ-имид, главным достоинством которого является высокая температура эксплуатации (до 240°C) [7]. Применение данного

обмоточного провода позволит снизить площадь сечения, что приведет к уменьшению масса-габаритных показателей всего проектируемого устройства.

Диаметры проводов обмоток:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_1}{\delta \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 40,21}{4 \cdot 3,14}} = 2,127 \text{ мм} \quad (14)$$

По рассчитанному диаметру выбираем провод ПНЭТ-имид с диаметром провода с изоляцией $d_1 = 2,196 \text{ мм}$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_{II}}{\delta \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,1}{4 \cdot 3,14}} = 1,33 \text{ мм} \quad (15)$$

Для вторичной обмотки выбираем провод ПНЭТ-имид с диаметром провода с изоляцией $d_2 = 1,388 \text{ мм}$

5.3 Расчет трансформатора Тр1

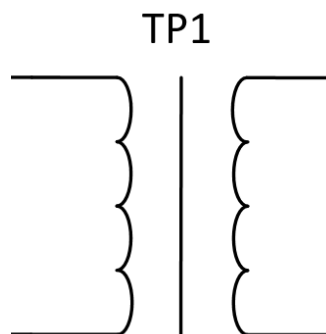


Рисунок 7 – Схема однофазного трансформатора с одной вторичной обмоткой

Расчет ведется аналогично Тр2 по методике [5]

Амплитудное значение напряжения первичной обмотки трансформатора определяется как:

$$U_{1\max} = U \cdot 0,95 = 27 \cdot 0,95 = 25,65 \text{ В} \quad (16)$$

Эффективное значение напряжения:

$$U_1 = \frac{U_{1\max}}{\sqrt{2}} = \frac{25,65}{\sqrt{2}} = 18,14 \text{ В} \quad (17)$$

Коэффициент трансформации:

$$K_{мп1} = \frac{2U_1}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{2 \cdot 18,4}{\sqrt{3} \cdot 36} = 0,582 \quad (18)$$

Ток в нагрузке определяется по выражению:

$$I_n = \frac{P_n}{U_n} = \frac{800}{36} = 22,2 \text{ A} \quad (19)$$

Ток в первичной обмотке:

$$I_1 = \frac{I_n}{K_{мп1} \cdot \eta} = \frac{22,2}{0,582 \cdot 0,95} = 40,21 \text{ A} \quad (20)$$

Эквивалентное сопротивление нагрузки, приведенное к напряжению первичной обмотки трансформатора, определяется по выражению:

$$R_{экв} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{18,14}{40,21} = 0,451 \text{ Ом} \quad (21)$$

Выберем сердечник и обмотки по известным значениям тока и напряжения, при этом число витков первичной обмоток рассчитывается исходя из наибольшего напряжения, прикладываемого к ней, чтобы исключить режим насыщения сердечника трансформатора.

Габаритная мощность трансформатора определяется по следующему выражению:

$$P_{\Gamma} = \frac{U_{1\max} \cdot I_1 + U_n \cdot I_n}{2} = \frac{25,65 \cdot 40,21 + 36 \cdot 22,2}{2} = 915,682 \text{ Вт} \quad (22)$$

Аналогично расчету Tr2 принимаем в качестве материала магнитопровода сплав 49КФ.

Задаем следующие параметры из справочных данных:

$k_{\phi} = 1,11$ - коэффициент формы напряжения для синусоиды;

$k_c = 0,85$ - коэффициент заполнения сердечника сталью для трансформаторов, выполненных из сплава 49КФ

$\delta = 8 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$ - плотность тока в обмотке трансформатора.

$\sigma = 0,25$ - коэффициент заполнения окна сердечника медью.

$B_m = 1,88 \text{ Тл}$ - индукция в магнитопроводе для стали 49КФ при частоте 400 Гц

$$S_o S_c = \frac{10^2 \cdot P_T}{2 \cdot f \cdot k_c \cdot k_\phi \cdot B_m \cdot \delta \cdot \sigma} = \frac{10^2 \cdot 915,682}{2 \cdot 400 \cdot 0,85 \cdot 1,11 \cdot 1,88 \cdot 8 \cdot 0,25} = 32,265 \text{ см}^4 \quad (23)$$

где S_o - площадь окна сердечника магнитопровода;

S_c - поперечное сечение сердечника.

Исходя из полученных данных выбираем сердечник ПЛ12,5х25 из стандартного ряда магнитопроводов, имеющий $S_o S_c = 37,6 \text{ см}^4$, $S_o = 12 \text{ см}^2$, $S_c = 3,13 \text{ см}^2$

Число витков на один вольт ЭДС в обмотках трансформатора определяются по выражению:

$$W_0 = \frac{10^4}{4 \cdot k_\phi \cdot B_m \cdot f \cdot S_c \cdot k_c} = \frac{10^4}{4 \cdot 1,11 \cdot 1,88 \cdot 400 \cdot 3,13 \cdot 0,85} = 1,126 \frac{\text{виток}}{\text{вольт}} \quad (24)$$

Число витков в первичной обмотке:

$$w_1 = U_{1\max} \cdot W_0 = 25,65 \cdot 1,126 = 29 \text{ витков} \quad (25)$$

Число витков во вторичной обмотке:

$$w_2 = \frac{\sqrt{3} \cdot w_1}{2} = \frac{\sqrt{3} \cdot 82}{2} = 71 \text{ виток} \quad (26)$$

Диаметры проводов обмоток:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_1}{\delta \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 40,21}{4 \cdot 3,14}} = 2,127 \text{ мм} \quad (27)$$

По рассчитанному диаметру выбираем провод ПНЭТ-имид с диаметром провода с изоляцией $d_1 = 2,196 \text{ мм}$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot I_2}{\delta \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 22,2}{4 \cdot 3,14}} = 1,881 \text{ мм} \quad (28)$$

Для вторичной обмотки выбираем провод ПНЭТ-имид с диаметром провода с изоляцией $d_2 = 1,974 \text{ мм}$

5.4 Расчет АИН1

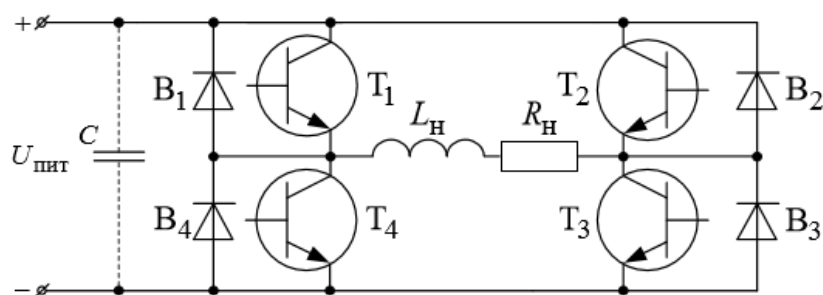


Рисунок 8 – Принципиальная схема однофазного автономного инвертора напряжения

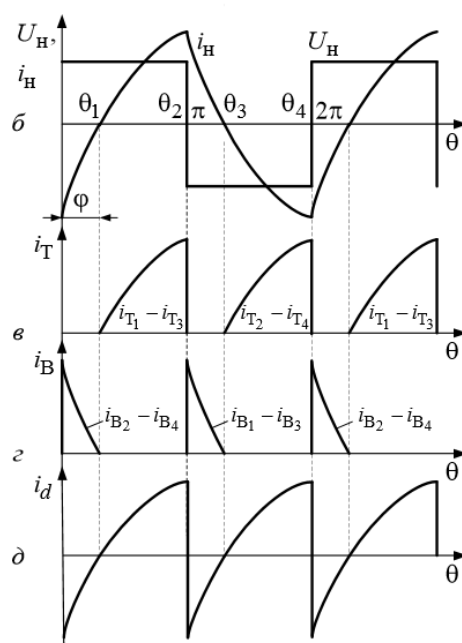


Рисунок 9 – Диаграммы, поясняющие работу однофазного автономного инвертора напряжения

Расчет проводим по методике [8]

По заданой мощности и напряжению нагрузки находим полное сопротивление нагрузки:

$$Z_n = \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_n\right)^2}{P_n} = \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 36\right)^2}{800} = 1,215 \text{ Ом} \quad (29)$$

Активное и индуктивное сопротивление нагрузки:

$$R_n = Z_n \cdot \cos \varphi = 1,215 \cdot 0,8 = 0,972 \text{ Ом} \quad (30)$$

$$X_n = Z_n \cdot \sin \varphi = 1,215 \cdot 0,6 = 0,729 \text{ Ом} \quad (31)$$

где по рекомендациям принимаем $\cos \varphi = 0,8$, $\sin \varphi = 0,6$

Индуктивность нагрузки:

$$L_n = \frac{X_n}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,729}{2 \cdot 3,14 \cdot 400} = 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (32)$$

Действующее значение тока нагрузки:

$$I_{нд} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{2 \cdot Z_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot 36}{2 \cdot 1,215} = 25,66 \text{ А} \quad (33)$$

Максимальное значение тока нагрузки:

$$i_{n\max} = \frac{-U}{R_n} \cdot \left(1 - \frac{2}{1 - e^{\frac{-\pi \cdot R_n}{X_n}}} \right) = \frac{-27}{0,972} \cdot \left(1 - \frac{2}{1 - e^{\frac{-3,14 \cdot 0,972}{0,729}}} \right) = 28,633 \text{ А} \quad (34)$$

Максимальное значение тока силовых ключей и обратных диодов

$$I_{VD\max/VT\max} = \frac{i_{n\max}}{K_{mp1}} = \frac{28,633}{0,582} = 49,2 \text{ А} \quad (35)$$

Действующее значение тока нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора:

$$I_{ндпр} = \frac{U_n}{Z_n \cdot K_{mp1}} = \frac{36}{1,215 \cdot 0,582} = 51 \text{ А} \quad (36)$$

Учитывая, что $U_{кз(VT1-VT4)} = U_{обр(VD1-VD4)} = U_{ншт}$ по рассчитанным максимальным значениям токов $I_{VT\max}, I_{VD\max}$ выбираем по каталогу тип силовых ключей и обратных диодов.

Проведя сравнение существующих типов транзисторных ключей [9] было принято решение в данном устройстве использовать полевые транзисторы типа MOSFET. Их преимущество в сравнении с биполярными транзисторами очевидны. Первое преимущество полевого MOSFET транзистора в том, что он управляется напряжением (электрическим полем), что упрощает схему и снижается затрачиваемую мощность на коммутацию. Второе преимущество - гораздо более высокая скорость коммутации за счет отсутствия неосновных носителей заряда. Третье преимущество - повышенная теплоустойчивость. Также стоит отметить, что карбид-кремниевая технология привнесла значительные усовершенствования в

производство MOSFET. Карбид-кремниевые MOSFET транзисторы обладают более широкой запрещенной зоной и способны работать при температуре свыше 200 °C.

В качестве силовых ключей выбираем полевые MOSFET транзисторы STP55NE06 [10], характеристики которых представлены в Таблице 1

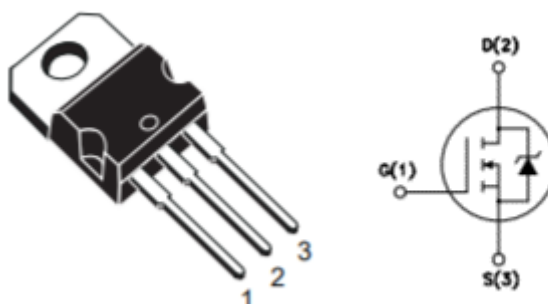


Рисунок 10 – полевой MOSFET транзистор STP55NE06

Таблица 1 – Параметры транзистора STP55NE06

Тип транзистора	MOSFET
Максимальная рассеиваемая мощность	130 Вт
Предельно допустимое напряжение сток-исток	60 В
Максимально допустимый постоянный ток стока	55 А
Сопротивление сток-исток открытого транзистора	0,022 Ом

В качестве обратных диодов выбираем диод Шоттки типа MBR6060PT [10] со следующими параметрами:

■ Корпус	TO-247-3 TO-247AD (TO-3P)
■ Максимальное обратное напряжение диода	60 В
■ Прямой ток диода (средний)	60 А
■ Прямое падение напряжения	750 мВ
■ Особенности	Шоттки
■ Обратный ток диода	1 мА
■ Рабочая температура	-55...150 °С

Рисунок 11 – Параметры обратного диода MBR6060PT

Применение диодов Шоттки обусловлено снижением прямого падения напряжения.

5.5 Расчет АИН2

Расчет проводим аналогично АИН1

По заданой мощности и напряжению нагрузки находим полное сопротивление нагрузки:

$$Z_n = \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot U_n\right)^2}{P_n} = \frac{\left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 72\right)^2}{800} = 4,86 \text{ Ом} \quad (37)$$

Активное и индуктивное сопротивление нагрузки:

$$R_n = Z_n \cdot \cos \varphi = 4,86 \cdot 0,8 = 3,88 \text{ Ом} \quad (38)$$

$$X_n = Z_n \cdot \sin \varphi = 4,86 \cdot 0,6 = 2,916 \text{ Ом} \quad (39)$$

Где по рекомендациям принимаем $\cos \varphi = 0,8$, $\sin \varphi = 0,6$

Индуктивность нагрузки:

$$L_n = \frac{X_n}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2,916}{2 \cdot 3,14 \cdot 400} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \quad (40)$$

Действующее значение тока нагрузки:

$$I_{нд} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_n}{2 \cdot Z_n} = \frac{\sqrt{3} \cdot 72}{2 \cdot 4,86} = 12,83 \text{ А} \quad (41)$$

Максимальное значение тока нагрузки:

$$i_{n\max} = \frac{-U}{R_n} \cdot \left(1 - \frac{2}{1 - e^{\frac{-\pi \cdot R_n}{X_n}}} \right) = \frac{-27}{3,88} \cdot \left(1 - \frac{2}{1 - e^{\frac{-3,14 \cdot 3,88}{2,916}}} \right) = 7,158 \text{ A} \quad (42)$$

Максимальное значение тока силовых вентилях и ключей

$$I_{VD\max/VT\max} = \frac{i_{n\max}}{K_{mp2}} = \frac{7,158}{0,291} = 24,6 \text{ A} \quad (43)$$

Действующее значение тока нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора:

$$I_{ндпр} = \frac{U_n}{Z_n \cdot K_{mp1}} = \frac{72}{4,86 \cdot 0,291} = 51 \text{ A} \quad (44)$$

Учитывая, что $U_{кэ(VT1-VT4)} = U_{обр(VD1-VD4)} = U_{num}$ по рассчитанным максимальным значениям токов $I_{VT\max}, I_{VD\max}$ выбираем по каталогу тип силовых ключей и обратных диодов.

Аналогично расчету АИН1 в качестве силовых включений принимаем полевые MOSFET транзисторы типа STP30N06 [10], характеристики которого представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Параметры транзистора STP30N06

Тип транзистора	MOSFET
Максимальная рассеиваемая мощность	105 Вт
Предельно допустимое напряжение сток-исток	60 В
Максимально допустимый постоянный ток стока	30 А
Сопротивление сток-исток открытого транзистора	0,05 Ом

В качестве обратных диодов выбираем диод Шоттки типа MBR3560 [10] со следующими параметрами:

■ Корпус	DO-4
■ Схема включения диодов	одиночный
■ Максимальное обратное напряжение диода	60 В
■ Прямой ток диода (средний)	35 А
■ Прямое падение напряжения	750 мВ
■ Особенности	Шоттки
■ Обратный ток диода	1,5 мА
■ Рабочая температура	-55...150 °С

Рисунок 12 – Параметры обратного диода MBR3560

5.6 Расчет выходного LC – фильтра

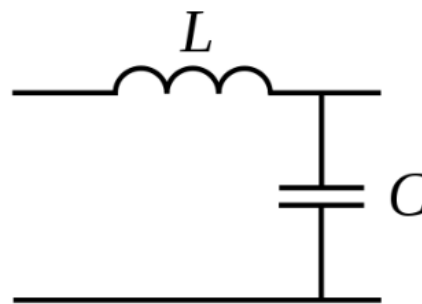


Рисунок 13 – Схема LC - фильтра

Расчет ведем по методике, указанной в [11].

Фильтр следует рассчитывать на подавление высшей гармоники, имеющей наименьший коэффициент фильтрации. Для определения значений индуктивности L_1 и емкости конденсатора фильтра C_1 воспользуемся уравнениями:

$$\omega^2 L_1 C_1 = \frac{(1 + k_r \cdot k_N / v^2)}{(1 + k_r \cdot k_N)} \quad (45)$$

Коэффициент гармоник, заданный в техническом задании, используем при расчете фильтра по приведенной выше формуле.

Коэффициент фильтрации будет равен:

$$k_N = \frac{\sin(\gamma\pi/2)}{\sin(v\gamma\pi/2)} \cdot v^3 = \frac{\sin\left(0,9 \cdot \frac{3,14}{2}\right)}{\sin\left(3 \cdot 0,9 \cdot \frac{3,14}{2}\right)} \cdot 27 = 29,9 \quad (46)$$

где $\gamma = 0,9$ - коэффициент скважности,

$\nu = 3$ - номер подавляемой гармоники.

Получаем из (44):

$$\omega^2 L_1 C_1 = \frac{(1 + k_T \cdot k_N / \nu^2)}{(1 + k_T \cdot k_N)} = \frac{(1 + 0,05 \cdot 29,9 / 3^2)}{(1 + 0,05 \cdot 29,9)} = 0,467$$

С другой стороны:

$$L_1 / C_1 = 2R_H^2 \cdot (1 - \omega^2 L_1 C_1) = 2 \cdot 17^2 \cdot (1 - 0,467) = 308,074 \text{ Гн/Ф} \quad (47)$$

В итоге получили два уравнения с двумя неизвестными, решая которые найдем значения индуктивности и емкости фильтра.

$$\begin{aligned} L_1 C_1 &= \frac{0,467}{(2 \cdot 3,14 \cdot 1000)^2} = 1,18 \cdot 10^{-8} \Rightarrow C_1 = \frac{1,18 \cdot 10^{-8}}{L_1} ; \\ L_1 / C_1 &= 308,074 \quad L_1^2 / 1,18 \cdot 10^{-8} = 308,074 \end{aligned}$$

Результат:

$$\begin{aligned} L_1 &= \sqrt{308,074 \cdot 1,18 \cdot 10^{-8}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \text{ Гн} \\ C_1 &= 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} \end{aligned}$$

Выбираем конденсатор емкостью 6,2 мкФ: К78-34 400В-6.2мкФ [5].

6 Система управления

Под системой управления понимают совокупность узлов и элементов, обеспечивающих формирование управляющих сигналов с заданными параметрами и по заданному алгоритму для управления состоянием силовых ключей преобразовательного устройства.

Систему управления трехфазным автономным инвертором напряжения по схеме Скотта строим на основе широтно-импульсной модуляции. Рассмотрим систему управления для однофазного мостового инвертора АИН 1, для АИН 2 система идентична, только сигнал управления будет сдвинут на 90 град.

АИН состоит из четырех транзисторов типа MOSFET. Правая стойка АИН, состоящая из транзисторов VT2, VT3 управляется от противофазных сигналов основной частоты 400 Гц. Левая стойка, состоящая из транзисторов VT1, VT4, управляется противофазным и модулированным по длительности

синусоидальному закону $U_{\text{мод}}$ сигналами. Шим-сигнал можно получить, сравнивая синусоидальное и пилообразное напряжение с помощью компаратора. Величину выходного напряжения можно регулировать изменением скважности ШИМ-сигнала $\gamma = t_{\text{имп}} / T$

Формирование импульсов положительной полярности на выходе инвертора обеспечивается при одновременном включении транзисторов, расположенных диагонально, например, транзисторы VT1 и VT2. Так как транзистор VT1 переключается с высокой частотой, то при его выключении транзистор VT2 остается включенным, что приводит к замыканию тока нагрузки через транзистор VT2 и обратный диод VD2. При этом на выходе инвертора напряжение равно сумме падений напряжения на транзисторе и диоде, которое близко к нулю. Аналогично создается отрицательная полуволна с другой диагональю транзисторов. Таким образом, полярность гладкой составляющей выходного напряжения определяется включением транзисторов VT2 или VT3, а высокочастотное заполнение и, соответственно, форма гладкой составляющей – переключением транзисторов VT1 и VT4.

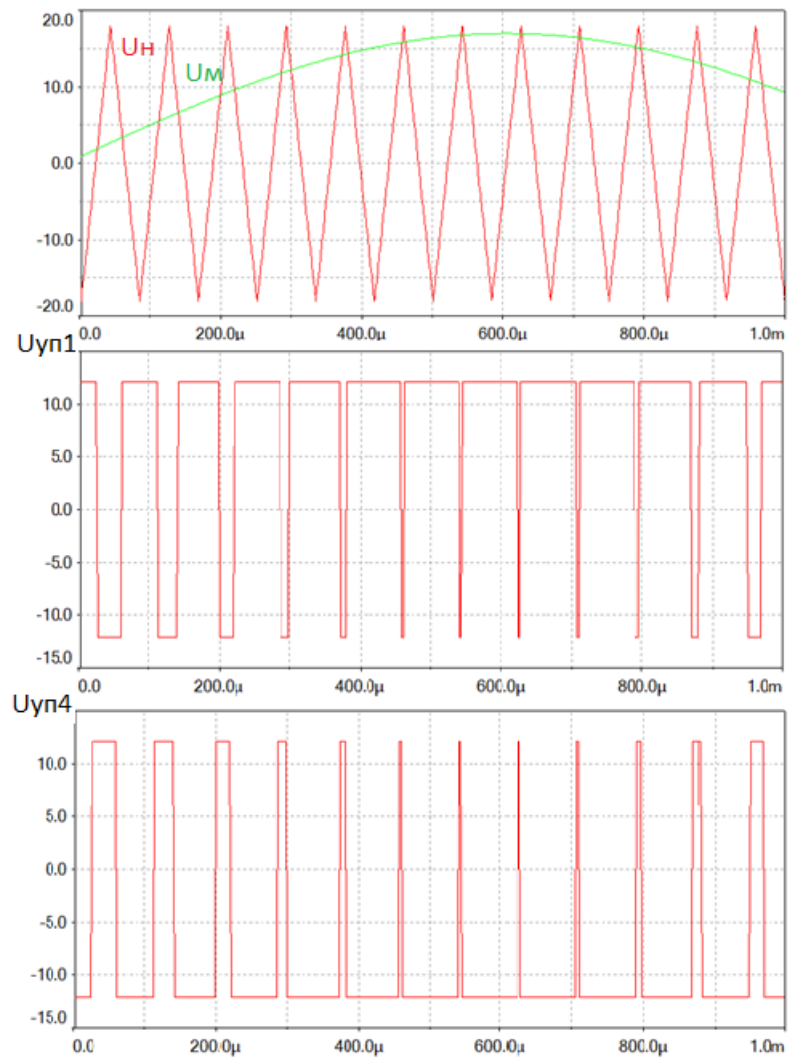


Рисунок 12 – Сигналы при двуполярной ШИМ в однофазном мостовом инверторе напряжения.

На Рисунке 12 обозначены:

U_m – модулирующий сигнал;

U_n – несущий сигнал;

7 Система защиты

В общем случае защита полупроводниковых преобразователей может осуществляться при помощи быстродействующих предохранителей и автоматических выключателей в сочетании с бесконтактными способами защиты, использующими естественную способность тириستоров восстанавливать свою запирающую способность при снижении прямого тока до нуля.

В качестве схемы защиты в разрабатываемом устройстве было решено использовать полуволновой метод [8]. Предельное время срабатывания защиты при полуволновом методе равно половине периода напряжения питающей сети.

Этот метод нельзя применять в инверторах, построенных на тиристорах из-за вероятности их опрокидывания. Но, так как в качестве ключевых элементов выбраны транзисторы, для запирания которых достаточно снять управляющее воздействие, то в разрабатываемой схеме применяем полуволновой метод.

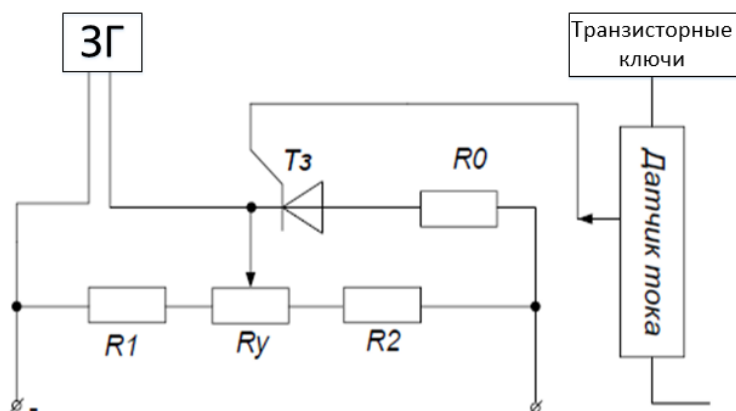


Рисунок 13 – Схема защиты трехфазного автономного инвертора по схеме Скотта.

В состав устройства защиты входят:

- потенциометр R_y ;
- датчик тока;
- тиристор защиты T_3 ;
- резисторы.

Потенциометром R_y регулируется уровень напряжения управления от нуля до максимального значения. При аварийном режиме включается тиристор защиты T_3 , подавая на вход системы управления запирающее напряжение, формирование импульсов управления прекращается.

В преобразователях переменного тока датчики тока обычно строятся с использованием трансформаторов тока. Схема такого датчика представлена на рисунке 14. Напряжение со вторичной обмотки трансформатора тока $ТТ$, пропорциональное току в нагрузке преобразователя, выпрямляется и с потенциометра R поступает в схему защиты.

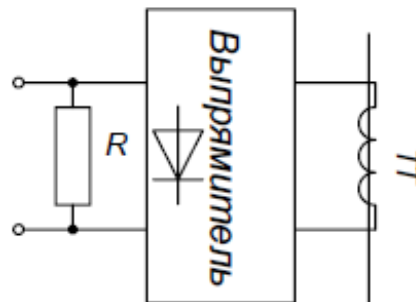


Рисунок 14 – Схема выбранного датчика тока

8 Моделирование преобразователя

После проведения расчетных операций необходимо проверить работу устройства в целом. Это может быть реализовано двумя способами:

- собрать в цехе реальный прототип устройства;
- воспользоваться различными инженерными продуктами и создать виртуальную модель устройства.

Конечно, в современном мире на производстве никто не будет изготавливать физический прототип для оценки работоспособности устройства. Во-первых, это дорого, особенно, если речь идет об устройстве авиационного назначения. Во-вторых, на изготовление прототипа уйдет много времени.

Используя данные, полученные при расчете элементов преобразователя, построим имитационную модель трехфазного автономного инвертора напряжения по схеме Скотта в программе MATLAB Simulink. Основной задачей данного раздела является проверка адекватности выполненных расчетов методом визуального программирования.

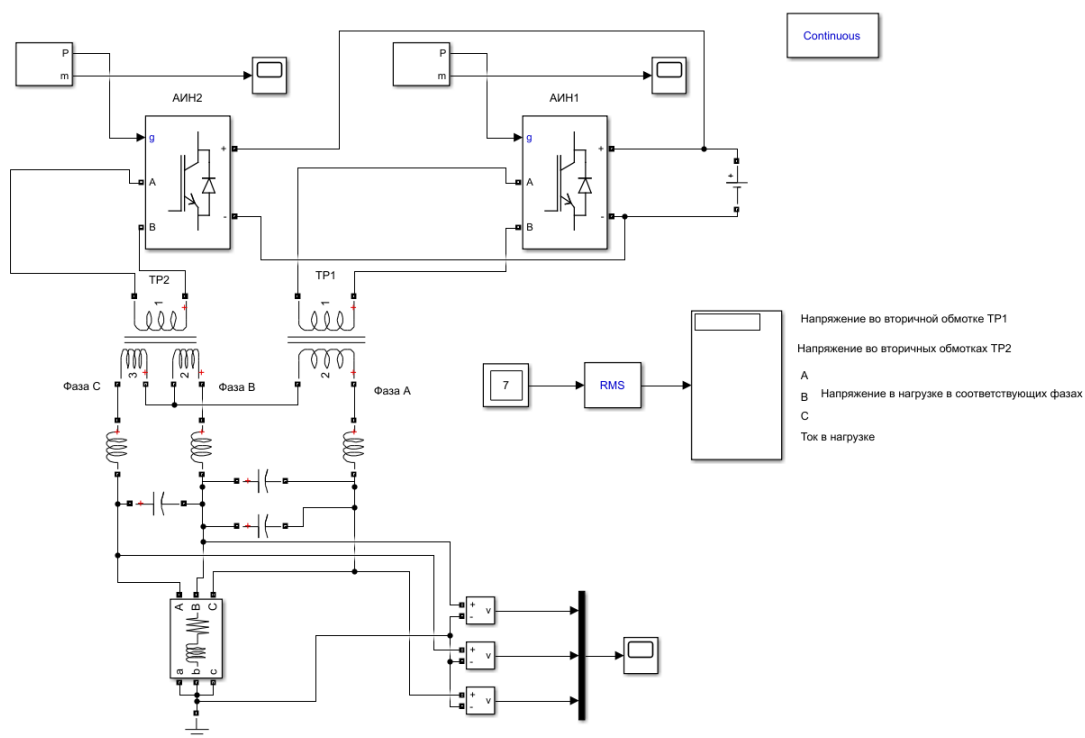
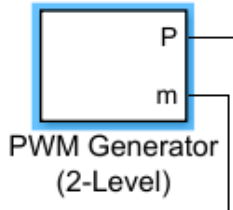
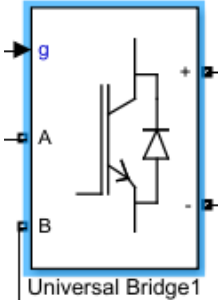
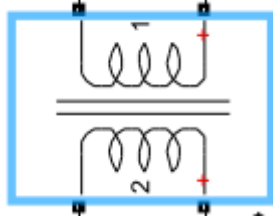
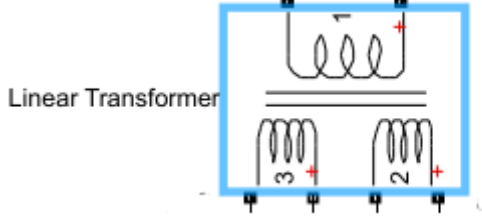


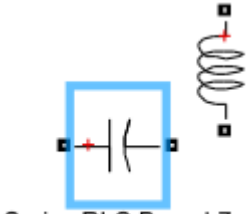
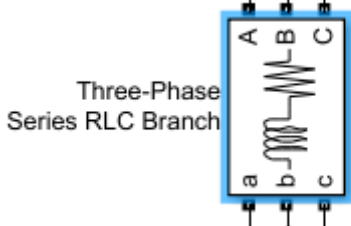
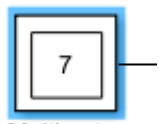
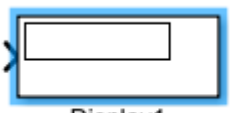


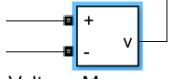
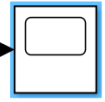
Рисунок 15 – Модель трехфазного автономного инвертора по схеме Скотта в MATLAB Simulink

Для создания модели использовались функциональные блоки, представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Назначение функциональных блоков

	<p>Блок-генератор пульсаций на силовые ключи. Имитация ШИМ. Настраивается частота и амплитуда несущего и модулирующего сигнала, задать начальную фазу в градусах.</p>
	<p>Блок – преобразователь универсальный. В данном случае выполняется в роли однофазного инвертора с выбранными MOSFET транзисторами и параллельно с ними соединенных диодов. Возможно настроить сопротивление силовых ключей.</p>
	<p>Блок, имитирующий однофазный трансформатор с одной вторичной обмоткой. Возможно настроить необходимое активное/индуктивное сопротивление обмоток, учесть ветвь намагничивания, установить необходимую мощность и частоту.</p>
	<p>Блок, имитирующий однофазный трансформатор с двумя вторичными обмотками (Tr2). Настройки аналогичны блоку выше.</p>

Продолжение Таблицы 3

 <p>Series RLC Branch7</p>	<p>Блок, реализующий ветвь сопротивления. R/L/C/RL/RC/RLC. В данной модели используется в конфигурации конденсатора и дросселя для имитации LC-фильтра</p>
 <p>Three-Phase Series RLC Branch</p>	<p>Блок, имитирующий трехфазную нагрузку с настраиваемыми параметрами активного и индуктивного сопротивления</p>
 <p>Multimeter</p>	<p>Блок – мультиметр. Для сбора сигналов с различных каналов для последующего численного отображения с помощью дисплея</p>
 <p>Display1</p>	<p>Блок – дисплей для отображения информации</p>
 <p>RMS2</p>	<p>Блок – преобразователь мгновенного значения ввода в среднеквадратичное значение вывода</p>
 <p>DC Voltage Source</p>	<p>Блок - источник постоянного напряжения 27 В</p>
 <p>Voltage Measurement</p>	<p>Блок измеритель напряжения в цепи (вольтметр)</p>
 <p>Scope1</p>	<p>Блок отображения сигналов (осциллограф)</p>

Для осуществления работы схемы необходимо настроить систему управления, задав параметры в блоке PWM Generator. Также предусмотрим сдвиг фазы управляющих импульсов двух инверторов. Качество выходного напряжения на нагрузке напрямую определяется частотой несущего пилообразного сигнала, поэтому устанавливаем это значение в 12 кГц.

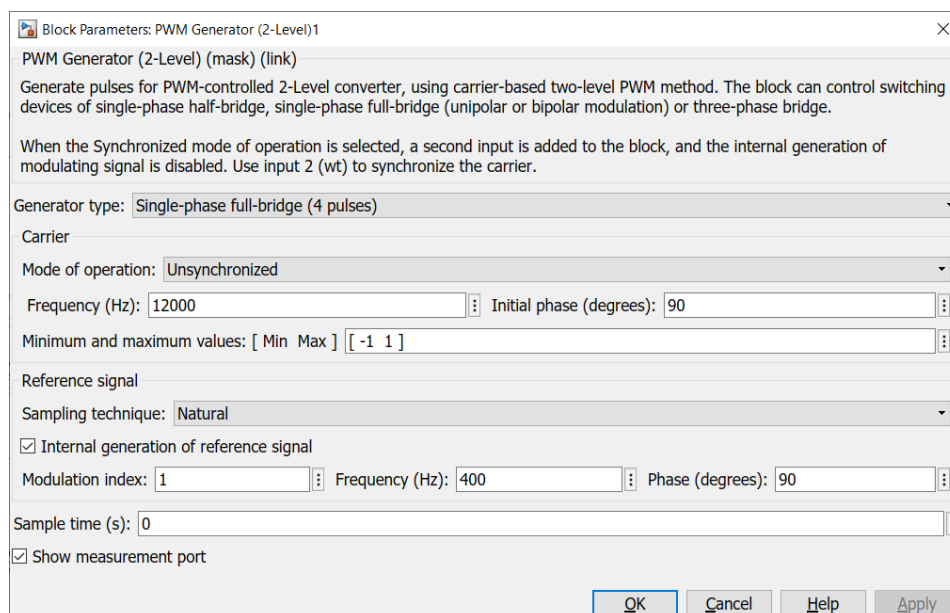


Рисунок 16 – Настроенные параметры блока управления ШИМ для АИН 2

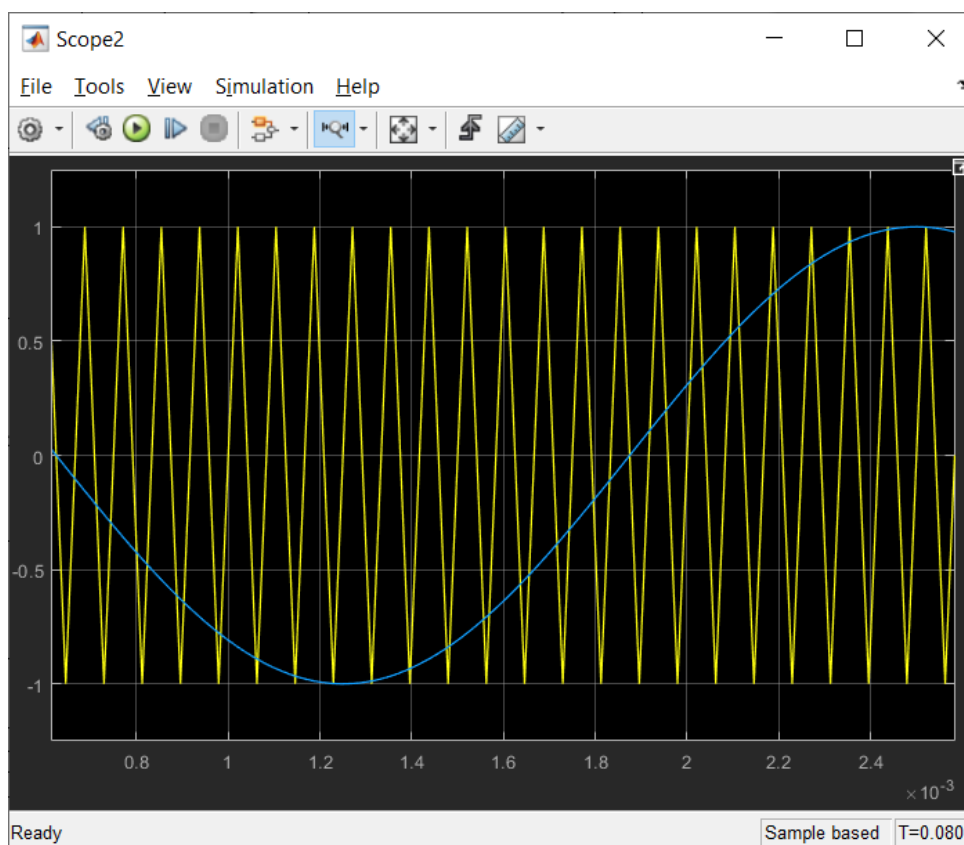


Рисунок 17 – Осциллограмма импульсов управления АИН 2

Установив в соответствующие блоки расчетные параметры элементов выполним имитацию работы преобразователя и снимем осциллограмму выходного напряжения в нагрузке.

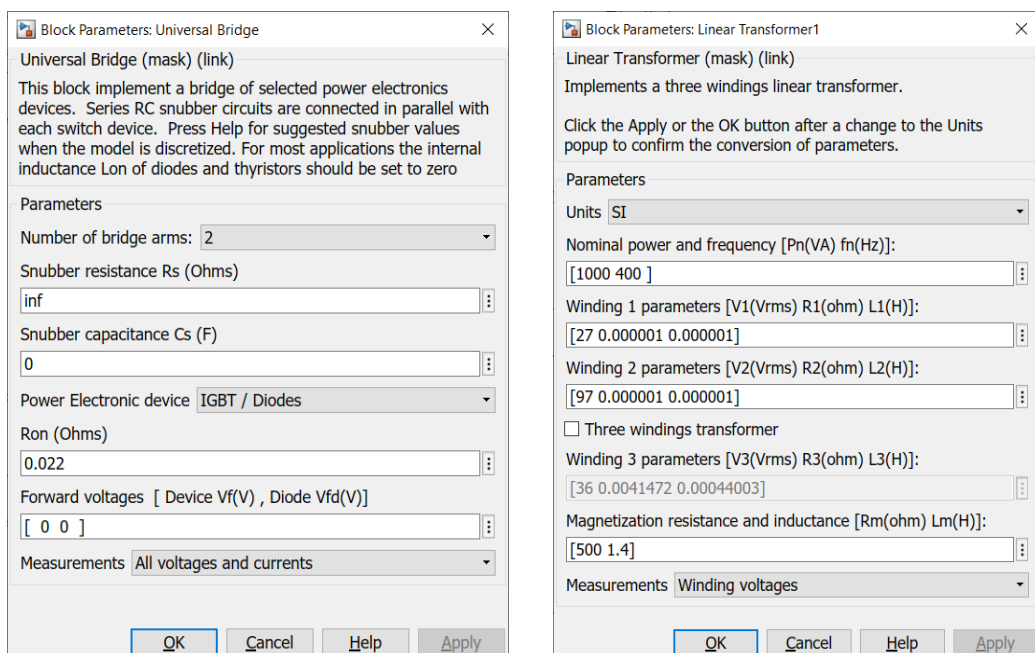


Рисунок 18 – Настройка параметров в АИН1 и Тр1

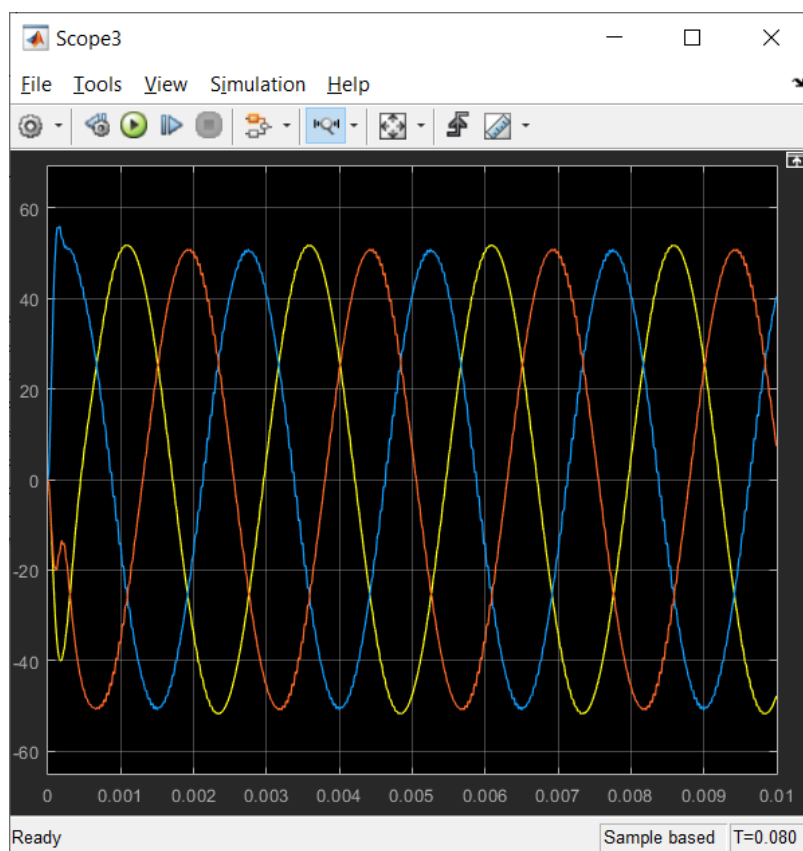


Рисунок 19 – Осциллограмма выходного напряжения преобразователя

С помощью блока-мультиметра зафиксировали ряд основных величин, необходимых для принятия решения об адекватности модели и работоспособности проектируемого преобразователя. В таблице 4 представлены значения тока и напряжения в соответствующих фазах нагрузки смоделированного преобразователя и значения, необходимые по техническому заданию и расчету.

Таблица 4 – Сравнения энергетических показателей

Фаза	Напряжение, В (эксп.)	Ток, А (эксп.)	Напряжение, В (тех. задание)	Ток, А (расчетный)
А	35,85	22,13	36	22,2
В	36,55	22,46		
С	35,72	22,05		

9 Моделирование в Multisim

Для контрольной проверки адекватности выполненных расчетов было принято решение воспользоваться другим программным пакетом, позволяющим создать имитационную схему преобразователя и получить выходную осциллограмму напряжения в нагрузке. Программное обеспечение Multisim имеет достаточно простой и понятный интерфейс, большую базу элементов и возможности их настройки. В отличие от MATLAB Simulink в настройках трансформатора можно задать число витков первичной и вторичной обмоток. Для коммутации в инверторе используем не транзисторы, а идеальные управляемые ключи с целью упрощения схемы управления и системы в целом.

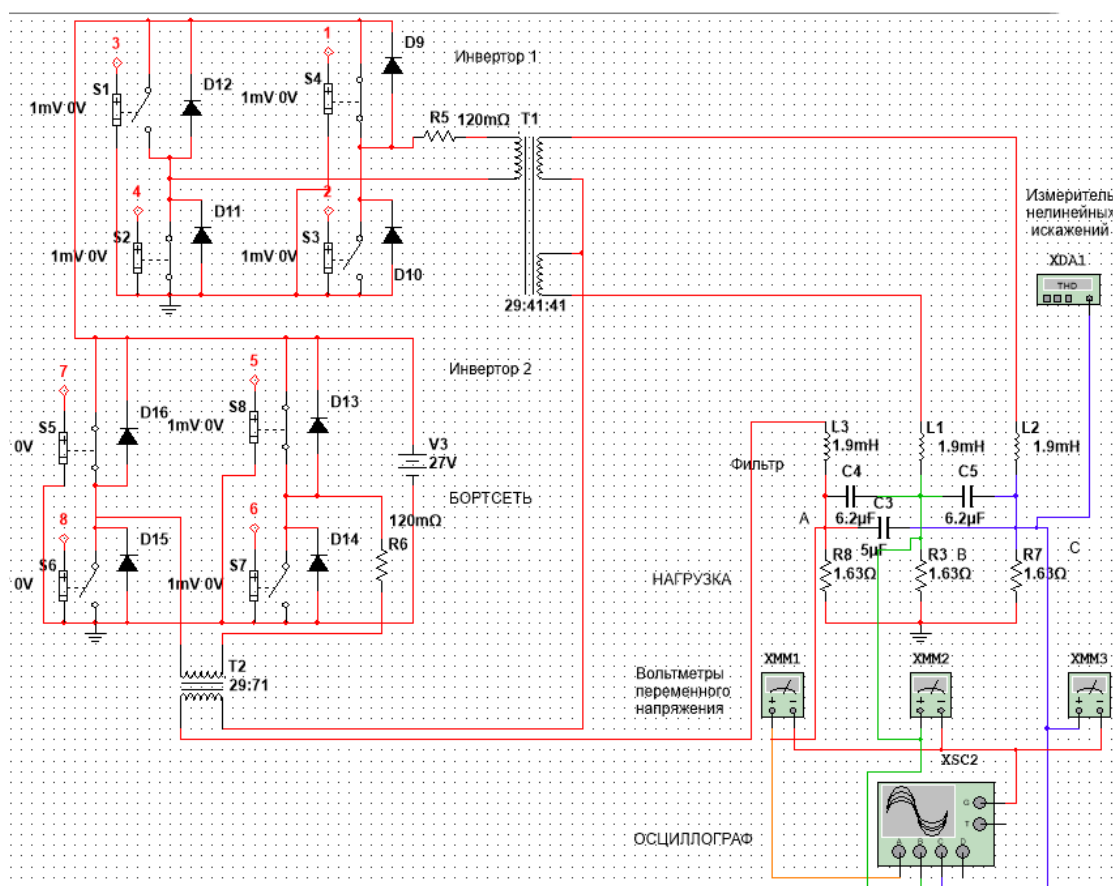


Рисунок 20 – Имитационная модель преобразователя в Multisim

Систему управления ключами также выполнили вручную с помощью источников переменного синусоидального напряжения, генератора пилообразного сигнала и компараторов, на которых происходит сравнение

этих двух сигналов и подаются импульсы управления на соответствующие ключи. Начальные фазы источников синусоидального сигнала сдвинуты друг относительно друга на 90 градусов для реализации схемы Скотта. Система управления представлена на Рисунке 21.

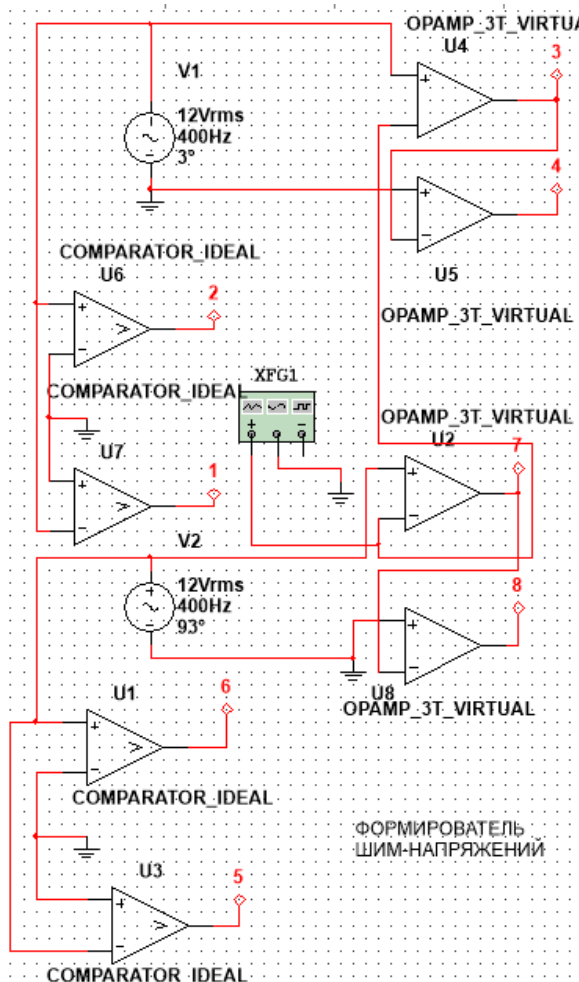


Рисунок 21 – Система управления ключами в Multisim

Аналогично моделированию в Simulink необходимо получить значения напряжения в каждой фазе нагрузки и осциллограмму выходного напряжения, сделаем это с помощью блоков, имитирующих вольтметр и осциллограф. Также, в Multisim с помощью функционального блока Distortion Analyzer возможно получить значение нелинейных искажений синусоиды в процентах, что позволит наглядно оценить качество преобразованной энергии.

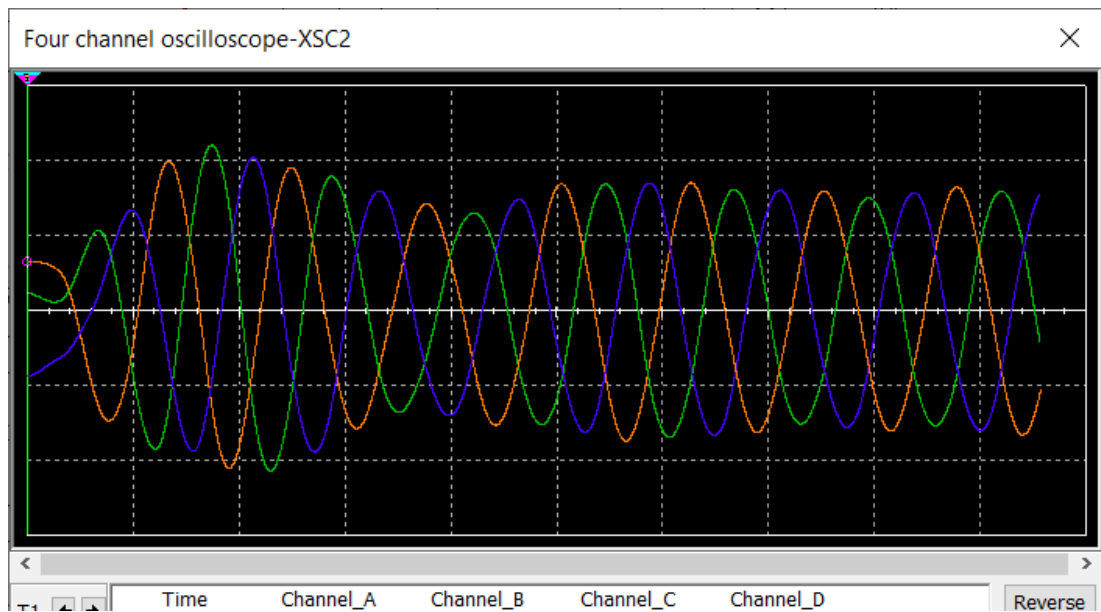


Рисунок 22 – Осциллограмма выходного напряжения на нагрузке

Полученная осциллограмма свидетельствует нам о том, что устройство работает корректно, после протекания переходного процесса на нагрузке мы получаем практически идеальную синусоиду. Видим равенство амплитуд напряжения в каждой фазе.

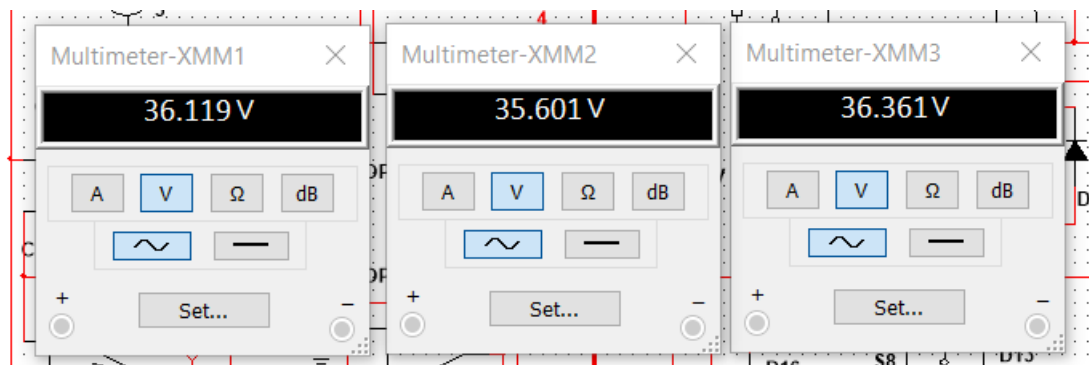


Рисунок 23 – Показания вольтметров в соответствующих фазах А, В и С

Данный рисунок демонстрирует соответствие напряжения в фазах нагрузки требуемому значению по техническому заданию.

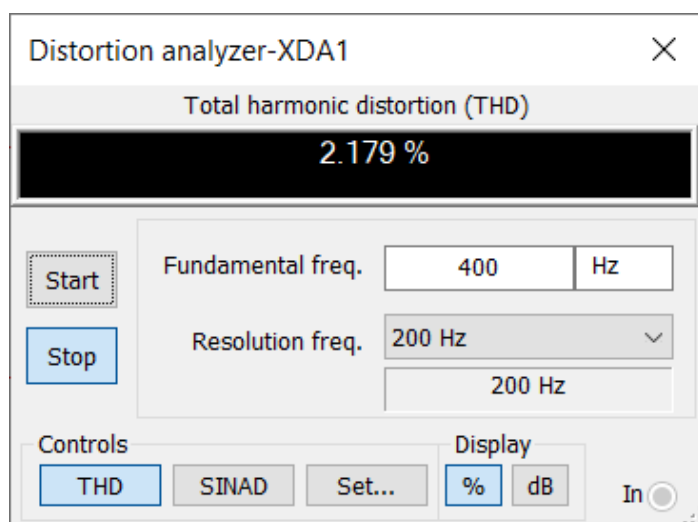


Рисунок 24 – Показания блока-измерителя нелинейных искажений

Подводя итог по проверочному моделированию преобразователя в Multisim, можно сказать, что полученные результаты коррелируют с результатами экспериментов при моделировании в Simulink, что говорит о том, что расчеты и подбор полупроводниковых устройств выполнен верно, система управления обеспечивает необходимую коммутацию и соотношение чисел витков вторичных обмоток трансформаторов $Tr1$ и $Tr2$ подобраны правильно.

10 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Цель проекта состоит в проектировании трехфазного автономного инвертора по схеме Скотта и создании имитационной модели для оценки адекватности расчетов и проверки выходных параметров.

Задачами данного проекта являются:

- Расчет и проектирование трехфазного автономного инвертора по схеме Скотта.
- Построение имитационной модели в программной среде MATLAB Simulink и получение осциллограммы выходного напряжения и выходных параметров в нагрузке.

В данном разделе ВКР рассмотрены вопросы финансового менеджмента. Техничко-экономическое обоснование научно-исследовательских работ проводится с целью определения и анализа трудовых и денежных затрат, направленных на их реализацию

10.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

10.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования

Целевым рынком для данного результата исследования будет являться авиакосмическая отрасль, где преимущественно и будет использоваться проектируемое устройство.

Сегмент рынка – предприятия, занимающиеся проектированием и испытанием самолетных устройств и систем. Провести более развернутую сегментацию не представляется возможным по главной причине:

- Разрабатываемое устройство будет использоваться узким кругом потребителей. Иначе говоря, проектирование и производство продукта производится по спецзаказу конкретного предприятия, под конкретные

требования, под конкретный летательный аппарат. То есть, это не массовое производство, соответственно сегментацию рынка для данного проекта провести невозможно.

10.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Общей схемой количественного анализа конкурентоспособности, которая может применяться на любом этапе существования изделий, является следующая:

1. Выбор базового образца, аналогичного по назначению и условиям эксплуатации с оцениваемой продукцией.
2. Определение перечня нормативных, технических и экономических параметров, подлежащих исследованию (показать в таблице).
3. Сравнение по каждому выбранному параметру проектируемого изделия и с соответствующими параметрами конкурентного образца (аналога).
4. Подсчет итоговых показателей

Общими и методологическими принципами при соблюдении данной схемы анализа являются учет предельности отдельных элементов потребности, с тем, чтобы при нахождении образца на предельном уровне потребности не делался вывод о большей конкурентоспособности анализируемого изделия с более высокими, чем у образца аналогичными параметрами; необходимость построения весовой базы для технических параметров на основе всесторонних рыночных исследований.

Каждому параметрическому показателю по отношению к изделию в целом (т.е. обобщенному удовлетворению потребности) соответствует некий вес B , разный для каждого показателя. Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i B_i, \quad (48)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;
 B_i – Вес показателя (в долях единицы);

B_i – балл i -го показателя;

Данные для оценки конкурентоспособности разрабатываемого новшества приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Оценка технического уровня новшества

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы		Конкурентоспособность	
		Бп	Бк	Кп	Кк
Технические критерии оценки ресурсоэффективности					
1. Масса	0,122	4	2	0,488	0,244
2. Помехоустойчивость	0,065	3	3	0,195	0,195
3.КПД	0,212	5	3	1,06	0,636
4. Коэффициент гармоник	0,102	4	2	0,408	0,204
5.Симметричность работы фаз	0,152	5	2	0,760	0,304
Экономические критерии оценки эффективности					
1.Конкурентоспособность	0,105	4	3	0,420	0,315
2.Предполагаемый срок эксплуатации	0,205	5	2	1,025	0,410
3.Цена	0,037	2	4	0,074	0,148
Итого	1	32	21	4,43	2,456

где $B_{п}, K_{п}$ - балл и конкурентоспособность проектируемого устройства;

$B_{к}, K_{к}$ - критерии конкурентного устройства ПО-500

В результате анализа конкурентных технических решений можно сделать вывод о том, что проектируемое устройство превосходит аналоги на рынке не только по техническим и масса-габаритным показателем, но и экономически выгоднее, так как имеет гораздо больший срок службы и

способно обеспечивать потребителей электроэнергией более высокого качества, выравнивая перекося фазных напряжений. Проектируемое устройство имеет высокую надежность и не требует проведения ремонтно-проверочных работ.

10.1.3 QuaD-анализ

Данный тип анализа проводится с целью определения перспективности разработки и целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. Для упрощения процедуры анализа, проведем оценку с помощью таблицы 6.

Таблица 6 – QuaD-анализ

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение	Средневзвешенное значение
Показатели оценки качества разработки					
1. Энергоэффективность	0,1	100	100	1	0,1
2. Помехоустойчивость	0,065	70	100	0,7	0,0455
3. Унифицированность	0,08	50	100	0,5	0,04
4. Уровень шума	0,043	100	100	1	0,043
5. Безопасность	0,074	100	100	1	0,074
6. Простота эксплуатации	0,15	70	100	0,7	0,105
7. Ремонтопригодность	0,12	70	100	0,7	0,084

Продолжение Таблицы 6.

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
8.Конкурентоспособность продукции	0,105	90	100	0,9	0,0945
9.Перспективность рынка	0,206	100	100	1	0,206
10.Финансовая эффективность научной разработки	0,057	90	100	0,9	0,0513
Итого	1	840	1000	0,84	

Оценка качества и эффективности технологии QuaD определяется по формуле:

$$П_{cp} = \sum B_i \cdot B_i \quad (49)$$

где $П_{cp}$ - средневзвешенное значение показателя качества и перспективность научной разработки;

B_i - вес показателя (в долях единицы);

B_i - средневзвешенное значение i-го показателя.

Получаем:

$$П_{cp} = \sum B_i \cdot B_i = 84,33$$

Значение $П_{cp}$ лежит в интервале от 80 до 100, что говорит нам о том, что разработка считается перспективной и благоприятна для вложения денежных средств.

10.1.4 SWOT-анализ

Этот анализ выполняется с целью выявления сильных и слабых сторон проекта, а также действий при возникновении той или иной кризисной ситуации. SWOT-анализ проводится в несколько этапов. Первый этап заключается в описании сильных и слабых сторон проекта.

Таблица 7 – Промежуточная матрица SWOT

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявлены высокие технические показатели.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Простота реализации.</p> <p>С4. Квалифицированный персонал.</p> <p>С5. Возможно настроить производство под ключ.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Требуются особые материалы и комплектующие для реализации проекта.</p> <p>Сл2. Длительный срок изготовления.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на разрабатываемый продукт.</p> <p>В3. Использование новых материалов для усовершенствования разработки.</p> <p>В4. Использование разработки в проектах полностью электрических самолетов.</p>		

Продолжение Таблицы 7

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования.</p> <p>У2. Ограничения в поставках материала и комплектующих.</p> <p>У3. Цена будет выше за счет применения дорогостоящих комплектующих</p>		
--	--	--

Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон проекта внешним условиям. В рамках данного этапа строим интерактивную матрицу проекта.

Таблица 8 – Интерактивная матрица проекта

Сильные стороны проекта						
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4	C5
	B1	+	0	-	-	-
	B2	+	+	+	-	0
	B3	+	+	-	-	-
	B4	+	+	0	0	+

В рамках третьего этапа объединим таблицы 7 и 8 в итоговую матрицу SWOT-анализа.

Таблица 9 – Матрица SWOT-анализа

	<p>Сильные стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>С1. Заявлены высокие технические показатели.</p> <p>С2. Экологичность технологии.</p> <p>С3. Простота реализации.</p> <p>С4. Квалифицированный персонал.</p> <p>С5. Возможно настроить производство под ключ.</p>	<p>Слабые стороны научно-исследовательского проекта:</p> <p>Сл1. Требуются особые материалы и комплектующие для реализации проекта.</p> <p>Сл2. Длительный срок изготовления.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p> <p>В2. Появление дополнительного спроса на разрабатываемый продукт.</p> <p>В3. Использование новых материалов для усовершенствования разработки.</p> <p>В4. Использование разработки в проектах полностью электрических самолетов.</p>	<p>- Разработка новых комплектующих для разрабатываемого решения.</p> <p>- Привлечение внимания к использованию данной технологии не только в летательных аппаратах</p> <p>- Увеличение производственных мощностей</p>	<p>- Внедрение собственных изготовленных комплектующих</p> <p>- Сокращение срока изготовления за счет усовершенствования технологического процесса</p>

Продолжение Таблицы 9

Угрозы:	- Привлечение инвесторов	Анализ ситуации с
У1. Несвоевременное финансовое обеспечение научного исследования.	- Доработка устройства	возможными решениями:
У2. Ограничения в поставках материала и комплектующих.	- Снижение цены за счет увеличения объёмов	- дальнейшая проработка проекта;
У3. Цена будет выше за счет применения дорогостоящих комплектующих	- Продвижение продукции с акцентированием на высокие технические характеристики	- закрытие проекта;

10.2 Планирование научно-исследовательских работ

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках технического задания;
- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения работ.

Этапы проектирования и соответствующие виды выполняемых работ представлены в таблице 10.

Таблица 10 - План разработки выполнения этапов проекта

№	Наименование работ	Исполнители (НР, инженер)	Продолжительность работ, дн
1.	Выдача и получение технического задания	НР, инженер	1
2.	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	10

Продолжение Таблицы 10

3.	Календарное планирование работ	НР, инженер	1
4.	Расчет элементов преобразователя	Инженер	10
5.	Проектирование модели	Инженер	17
6.	Проверка полученных результатов	НР, инженер	2
7.	Исследование характеристик модели	Инженер	7
8.	Анализ полученных результатов	Инженер	7
9.	Оформление пояснительной записки	Инженер	10
10.	Проверка пояснительной записки и чертежей	НР, инженер	2
	Итого	НР	6
		Инженер	67

На основе таблицы 10 строим календарный план-график (таблица 11). График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно- исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени написания ВКР. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу.

Таблица 11 – Календарный план график

№	Наименование работ	Исполнители (НР, инженер)	Количество дней	Продолжительность выполнения работ						
				Апрель			Май			Июнь
				1	2	3	1	2	3	1
1.	Выдача и получение технического задания	НР, инженер	1							
2.	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	10							
3.	Календарное планирование работ	НР, инженер	1							
4.	Расчет элементов преобразователя	Инженер	10							
5.	Проектирование модели	Инженер	17							
6.	Проверка полученных результатов	НР, инженер	2							
7.	Исследование характеристик модели	Инженер	7							
8.	Анализ полученных результатов	Инженер	7							
10.	Оформление пояснительной записки	Инженер	10							
11.	Проверка пояснительной записки и чертежей	НР, инженер	2							
	- руководитель - инженер									

10.2.1 Смета затрат на проект

При составлении сметы должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением.

Расчет капитальных затрат на выполнение проекта выполняется по следующей формуле:

$$\sum K_{\text{проекта}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{ам}} + K_{\text{з/п}} + K_{\text{со}} + K_{\text{пр}} + K_{\text{накл}}, \quad (50)$$

где $K_{\text{мат}}$ - материальные затраты необходимые для реализации проекта;

$K_{\text{ам}}$ - амортизация на компьютерную технику;

$K_{\text{з/п}}$ - затраты на заработную плату;

$K_{\text{со}}$ - затраты на социальные нужды;

$I_{\text{ам}}$ - амортизационные издержки;

$K_{\text{пр}}$ - прочие издержки;

$K_{\text{накл}}$ - накладные расходы.

10.2.2 Материальные затраты

Материальные затраты включают в себя стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта, такие как бумага, ручка, тетрадь, картридж для принтера, CD-диск и др. Принимаем величину материальных затрат $k_{\text{мат}} = 1000 \text{ р.}$

10.2.3 Амортизация компьютерной техники

В ходе выполнения проекта была использована компьютерная техника, находящиеся в 042 аудитории 8 корпуса. Амортизация определяется по следующей формуле:

$$K_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} \cdot C_{\text{кт}} \cdot \frac{1}{T_{\text{сл}}} \quad (51)$$

где $T_{\text{исп.кт}}$ - время использования компьютерной техники;

$T_{\text{кал}}$ - календарное время;

$C_{\text{кт}}$ - цена компьютерной техники;

$T_{\text{сл}}$ - срок службы компьютерной техники.

$$K_{\text{ам}} = \frac{61}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 835,62 \text{ р.}$$

10.2.4 Основная заработная плата исполнителей

Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Месячная заработная плата определяется по формуле:

$$ЗП_{\text{мес}} = ЗП_{\text{о}} \cdot k_1 \cdot k_p, \quad (52)$$

где $ЗП_{\text{о}}$ - месячный оклад исполнителей; (НР – 26500 р, инженер - 17000 р)

$k_1 = 1,1$ - коэффициент, учитывающий неотработанное время (отпуск);

$k_p = 1,3$ - районный коэффициент для Томска.

Зарплата инженера в месяц:

$$ЗП_{\text{инж}} = 17000 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 24310 \text{ р.}$$

Зарплата научного руководителя в месяц:

$$ЗП_{\text{нр}} = 26500 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 37609 \text{ р.}$$

Фактическая заработная плата:

$$ЗП_{\text{ф}} = \frac{ЗП_{\text{м}}}{21} \cdot n_{\text{ф}}, \quad (53)$$

где $ЗП_{\text{м}}$ - месячная зарплата исполнителя;

$n_{\text{ф}}$ - фактическое количество дней, потраченных на разработку проекта

Фактическая заработная плата для научного руководителя:

$$ЗП_{\text{ф}} = \frac{37609}{21} \cdot 6 = 10745,43 \text{ р.}$$

Фактическая заработная плата для инженера:

$$ЗП_{\phi} = \frac{24310}{21} \cdot 67 = 77560,48 \text{ р.}$$

Общие затраты на заработную плату:

$$K_{з/н} = ЗП_{инж} + ЗП_{пр}; \quad (54)$$

$$K_{з/н} = 10745,43 + 77560,48 = 88305,91 \text{ р.}$$

10.2.5 Отчисления во внебюджетные фонды

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Затраты на социальные нужды составляют 30% от основной заработной платы:

$$K_{co} = 0,3 \cdot K_{з/н}; \quad (55)$$

$$K_{co} = 0,3 \cdot 88305,91 = 26491,8 \text{ р.}$$

10.2.6 Прочие затраты

Прочие затраты включают в себя все расходы, связанные с налоговыми сборами (не предусмотренными в предыдущих статьях), отчисления внебюджетные фонды, платежи по страхованию, оплата услуг связи, представительские расходы, затраты на ремонт и прочее.

Прочие затраты принимаются в размере 10% от суммы уже рассчитанных нами ранее затрат:

$$K_{np} = 0,1 \cdot (K_{mat} + K_{ам} + K_{з/нл} + K_{co}); \quad (56)$$

$$K_{np} = 0,1 \cdot (1000 + 836,62 + 88305,91 + 26491,8) = 14312,45 \text{ р.}$$

10.2.7 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, электроэнергия, почтовые и телеграфные расходы, размножение материалов и т.д.

Накладные расходы принимаются в размере 200% от основной заработной платы:

$$K_{\text{накл}} = 2 \cdot K_{\text{з/пл}}; \quad (57)$$

$$K_{\text{накл}} = 2 \cdot 88305,91 = 176611,82 \text{ р.}$$

Произведем итоговый расчет плановых затрат на выполнение проекта:

$$K_{\text{проекта}} = 1000 + 836,62 + 88305,91 + 26491,8 + 14312,45 + 176611,82 = 307558,6 \text{ р.}$$

На основании рассчитанных величин затрат выпускной квалификационной работы составим таблицу 12

Таблица 12 – Расчет затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	1000
Амортизация компьютерной техники	836,62
Затраты по основной заработной плате исполнителей	88305,91
Отчисления во внебюджетные фонды	26491,8
Прочие расходы	14312,45
Накладные расходы	176611,82
Бюджет затрат НТИ	307558,6

В результате проделанной работы в данном разделе была проведена оценка потенциала проектируемого инвертора по схеме Скотта, исходя из которой можно сделать вывод об актуальности данной разработки. С помощью SWOT-анализа выявлены сильные и слабые стороны проекта, а также определены пути решения проблем при возникновении кризисных

ситуаций. Также составлен календарный план-график работ и рассчитана полная смета затрат на проектирование.

10.3 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель определяется как:

$$I_{финр}^{исп} = \frac{\Phi_i}{\Phi_{max}} \quad (58)$$

где $I_{финр}^{исп}$ - интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_i - стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} - максимальная стоимость исполнения.

Так как в данном проекте мы рассматриваем только один возможный вариант исполнения, $\Phi_i = \Phi_{max}$, ввиду чего интегральный финансовый показатель равен единице. Поэтому, данную разработку необходимо оценивать только по показателю ресурсоэффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности определяется как:

$$I_p = \sum a_i \cdot b_i \quad (59)$$

где a_i - весовой коэффициент параметра разработки;

b_i - бальная оценка параметра.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности проведем с помощью таблицы 13.

Таблица 13 – Оценка характеристик

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка
1.Помехоустойчивость	0,15	3
2.Энергосбережение	0,2	4
3.Надежность	0,3	5
4.Удобство эксплуатации	0,2	5
5.Материалоемкость	0,15	4
ИТОГ	1	

$$I_p = \sum a_i \cdot b_i = 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,35$$

Интегральный показатель эффективности для данного проекта равен интегральному показателю ресурсоэффективности.

Данные показатели близки к максимально возможному значению при этой системе оценивания ($I_{p.\max} = 5$), следовательно, можем сделать вывод о том, что проект эффективен с позиции ресурсоэффективности.

11 Социальная ответственность

11.1 Введение

Целью данного раздела ВКР является принятие проектных решений, исключающих несчастные случаи и профессиональные заболевания в производстве автономного трехфазного инвертора по схеме Скотта, обеспечивающих снижение вредных воздействий на окружающую среду, безопасность в чрезвычайных ситуациях.

Область применения данного устройства – системы питания бортового оборудования, где необходимо эффективно преобразовать постоянный ток в переменный с обеспечением требуемого качества. На летательных аппаратах данные преобразователи применяются для питания отдельных групп потребителей, требующих для своего функционирования параметры электрической энергии, отличные от тех, которые выдают основные (первичные) источники, т. е. генераторы. Особенными элементами данного устройства являются два высокочастотных трансформатора, вторичные обмотки которых соединены определенным образом – по схеме Скотта.

Актуальность проекта заключается в том, что производство и сборка устройства происходит в цехах, в которых присутствуют вредные и опасные факторы, оказывающие влияние как на сотрудников, так и на окружающую среду. Следовательно, необходимо спроектировать помещение таким образом, чтобы минимизировать воздействие этих факторов.

Разработкой данного устройства не привязана к какому-либо административному или географическому положению и может осуществляться на любом предприятии этой отрасли.

11.2 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Рабочая зона сотрудника, производящего изготовление и сборку проектируемого устройства находится в закрытом помещении с верстаком, слесарным оборудованием и тд. Выполнение работы на этой рабочей зоны относится к работам с вредными условиями труда и регламентируется [13], а именно продолжительность рабочей смены при 36 часовой рабочей неделе не должен превышать 8 часов.

Защита персональных данных работника также регламентируется [13] и должна быть обеспечена работодателем за счет его средств. Стоит отметить, что работник и работодатель должны совместно разрабатывать меры защиты персональных данных.

Так как работа производится при вредных условиях труда, оплата этого труда должна устанавливаться в повышенном размере, а именно, надбавка не менее 4 % тарифной ставки. Конкретные размеры повышения оплаты труда устанавливаются работодателем совместно с работником. Также работникам предоставляется ежегодный дополнительный отпуск, минимальная продолжительность которого составляет 7 календарных дней.

Производство проектируемого устройства серийное, поэтому работодатель обязан обеспечить необходимые условия для выполнения норм выработки, в частности: исправное состояния помещений, оборудования, технологической оснастки, надлежащее качество средств и предметов, необходимых выполнения работы.

Особенностей обязательного социального страхования и пенсионного обслуживания нет.

Преимущественно выполнение работ производится стоя, поэтому рабочее место должно соответствовать требованиям [14], а именно, необходимо учесть антропометрические показатели работника, обеспечить регулировку рабочей поверхности верстака, удобный подход к верстаку и необходимым агрегатам и другое.

11.3 Производственная безопасность

Для проектируемого рабочего места можно выделить ряд вредных и опасных производственных факторов согласно [15]. Преимущественно, эти факторы проявляются на этапе изготовления изделия.

Таблица 14 – Возможные опасные и вредные производственные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изгото вление	Эксплу атация	
1.Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	Требования по микроклимату устанавливаются СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003. [16]
2. Превышение уровня шума		+		Требования к уровню шума СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 [17]
3.Отсутствие или недостаток естественного света	+	+		Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [18].
4. Повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека		+	+	Требования по электробезопасности ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов. [19]

11.4 Анализ опасных и вредных производственных факторов

11.4.1 Отклонение показателей микроклимата

В частности, вредным фактором производственной среды является пониженная подвижность воздуха [16], обусловленная плохой вентилируемостью помещения в связи с отсутствием вентиляционной системы. Следствием наличия теплоотдающих элементов установки будет

повышенная температура воздуха рабочей зоны [16], которая может резко ухудшить самочувствие работника и значительно снизить производительность труда. Так как производимые работы связаны с постоянной ходьбой и перемещением изделий в положении стоя и сидя, требующие определенного физического напряжения, принимаем категорию работ средней тяжести.

Помещение цеха характеризуется:

- наличием большого количества оборудования;
- повышенной температурой.

Оптимальные и допустимые нормы микроклимата в рабочей зоне производственных помещений представлены в таблице 15

Таблица 15 – Климатические нормы

Сезон года	Категория работ	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с	
		По ГОСТ 12.1.005 – 88		По ГОСТ 12.1.005 – 88		По ГОСТ 12.1.005 – 88	
		Оптим альная	Допус тимая	Оптим альная	Допус тимая	Оптим альная	Допус тимая
Холодный	Средней тяжести	17 – 19	15-21	40 – 60	75	0,2	0,4
Тёплый со значительным избытком тепла	Средней тяжести	20 – 22	16-27	40 – 60	70	0,3	0,2-0,5

11.4.2 Превышение уровня шума

Часть технологического процесса исследования и проверки трехфазного автономного инвертора по схеме Скотта основана на работе с установками и оборудованием, являющимся источником повышенного уровня шума, что относится к вредным факторам производственной среды.

Шум — один из наиболее распространенных неблагоприятных факторов производственной среды. Основные производственные процессы,

сопровождающиеся шумом — это работа насосов, вентиляторов и др. Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум и на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Оптимальным средством защиты могут служить промышленные наушники.

Гигиенические нормы шума, согласно [20] представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Гигиенические нормы шума

Рабочее место	Уровни звукового давления, дБ									По шкале
	11,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Цех	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80
Щит управления	96	83	74	68	63	60	57	55	54	65

11.4.3 Недостаток естественного света

Так как изготовление и сборка инвертора производится в цехах, то данные производственный фактор оказывает большое влияние на его работоспособность. Согласно исследованиям, отсутствие или недостаток естественного освещения на рабочем месте может вызвать ухудшение самочувствия, привести к потере сна и ослаблению здоровья. Специалисты полагают, что причина отрицательного воздействия может заключаться в изменении циркадных ритмов из-за недостатка естественного света. Поэтому следует уделять большое внимание достаточному дневному освещению для укрепления здоровья и морального состояния работников.

В зависимости от напряжения зрительного аппарата при выполнении работы освещенность на предприятиях делят на восемь разрядов - от наивысшей точности до общего наблюдения за ходом производственного процесса.

В таблице 17 приведены нормируемые значения КЕО.

Таблица 17 - Нормируемые значения КЕО

Характеристика выполняемой зрительной работы	Наименьший размер объекта различения, мм	Разряд зрительной работы	Значение КЕО в при естественном освещении, %	
			верхнем и комбинированном	боковом
Высокой точности	0,3 ... 0,5	III	5	2,0
Средней точности	от 0,5 до 1,0	IV	4	1,5

11.4.4 Повышенное значение напряжения установок

По завершении сборки высокочастотных трансформаторов, которые являются основной частью проектируемого изделия, проводится ряд приемосдаточных испытаний. В частности, проверку изоляции осуществляют высоким напряжением. Соответственно, при неправильной эксплуатации оборудования возможно поражение им работника.

В результате действия электрического тока на организм возникают различные нарушения его жизнедеятельности вплоть до полной остановки сердца и угнетения работы легких. От сочетания характеристик электрического тока зависят его повреждающие возможности в конкретных условиях.

Предельно допустимые значения напряжений прикосновений и токов указы в таблице 18 на основании [19]

Таблица 18 - Предельно допустимые значения токов и напряжений

Род тока	Нормируемая величина	Предельно допустимые значения, не более, при продолжительности воздействия тока t,с							
		0,01-0,08	0,1	0,2	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
Переменный 50 Гц	U, В	550	340	135	105	85	75	70	60
	I, мА	650	400	160	125	90	75	65	50
Переменный 400 Гц	U, В	650	500	500	200	140	130	110	100
	I, мА								
Постоянный	U, В	650	500	400	250	230	220	210	200
	I, мА								

В рассматриваемом помещении необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и её непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; защитное заземление и защитное отключение.

Также, используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, коврики и боты, указатели напряжения, изолирующие подставки, а также инструменты с изолированными рукоятками.

Обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия опасных и вредных факторов на работающего.

Для снижения влияния вредных факторов микроклимата в производственном помещении необходимо предусмотреть систему вентиляции и кондиционирования. Проводить влажную уборку не реже, чем один раз в смену. Также для обеспечения нормального микроклимата предусматривается установка систем воздушного отопления, совмещенных с вентиляцией

Для снижения влияния шума могут быть произведены такие операции, как: установка звукоизолирующих кабин; использование звукоизолирующих кожухов и экранов.

На рабочих местах, где трудовая деятельность ведется в условиях отсутствия естественного освещения, необходимо проводить мероприятия, направленные на уменьшение уровня вредности условий труда. В число таких мероприятий входят:

- улучшение условий путем использования искусственного освещения;
- защита временем, то есть сокращение продолжительности пребывания работников в помещении без естественного освещения;
- профилактическое ультрафиолетовое облучение работников. В этом случае источники ультрафиолетового излучения устанавливают рядом с обычными осветительными лампами, за счет чего достигается обогащение обычного искусственного освещения ультрафиолетовым излучением.

При недостатке естественного освещения в помещениях также возможно принятие следующих мер:

- анализ степени загрязненности стекол в светопроемах, их очистка и дальнейшие контрольные измерения коэффициента естественной освещенности, который показывает, какая часть наружного освещения попадает на рабочие места производственного помещения;
- при наличии в помещении зон с недостаточным и достаточным уровнем естественного освещения изменение размещения рабочих мест с их переносом в зону с достаточным уровнем естественного освещения;
- косметический ремонт помещения с применением светлых отделочных материалов.

Для снижения вероятности электропоражения рабочего могут производиться следующие мероприятия:

- использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов;
- установка указателей напряжения, изолирующих подставок.

11.5 Экологическая безопасность

Работа в проектируемом производственном помещении сопряжена с образованием и выделением газообразных, жидких и твердых отходов.

Газообразные отходы, загрязняющие воздух помещения: естественные выделения - углекислый газ, пары воды, летучие органические соединения - ЛОС (альдегиды, кетоны), азотистые соединения; бытовая пыль; ЛОС, выделяющиеся в процессе эксплуатации отделочных материалов. Перед выбросом воздух помещений подвергается обязательной очистке в фильтровентиляционных системах, что предотвращает атмосферу от загрязнения. Жидкие отходы - бытовые отходы, образующиеся в процессах влажной уборки помещений, при пользовании водопроводом, туалетом и т.п., сбрасываются в городскую канализацию и далее поступают в системы централизованной очистки на городских очистных сооружениях.

При обращении с твердыми отходами: бытовой мусор (отходы бумаги, отработанные специальные ткани, пищевые отходы); отработанные люминесцентные лампы, комплектующие и запчасти, утратившие в результате износа потребительские свойства – надлежит руководствоваться [21]: бытовой мусор после предварительной сортировки складировать в специальные контейнеры для бытового мусора (затем специализированные службы вывозят мусор на городскую свалку); утратившее потребительские свойства офисное оборудование передают специальным службам (предприятиям) для сортировки, вторичного использования или складирования на городских мусорных полигонах. Отработанные люминесцентные лампы утилизируются в соответствии с [22]. Люминесцентные лампы, применяемые для искусственного освещения, являются ртутьсодержащими и относятся к 1 классу опасности. Ртуть люминесцентных ламп способна к активной воздушной и водной миграции. Интоксикация возможна только в случае разгерметизации колбы, поэтому основным требованием экологической безопасности является сохранность

целостности отработанных ртутьсодержащих ламп. Отработанные газоразрядные лампы помещают в защитную упаковку, предотвращающую повреждение стеклянной колбы, и передают специализированной организации для обезвреживания и переработки. В случае боя ртутьсодержащих ламп осколки собирают щеткой или скребком в герметичный металлический контейнер с плотно закрывающейся крышкой, заполненный раствором марганцевокислого калия. Поверхности, загрязненные боем лампы, необходимо обработать раствором марганцевокислого калия и смыть водой. Контейнер и его внутренняя поверхность должны быть изготовлены из не адсорбирующего ртуть материала (винипласта).

11.6 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее вероятной чрезвычайной ситуацией на рассматриваемом рабочем месте может быть возникновение пожара. Пожары – неконтролируемый процесс горения, уничтожающий или повреждающий материальные ценности и создающий опасность для жизни человека.

Обеспечение пожаробезопасности начинается с определения класса взрывоопасной зоны или класса пожароопасной зоны данного производственного помещения.

Для проектируемого помещения основными причинами пожара могут быть: перегрузка проводов, короткое замыкание, большие переходные сопротивления в электрических цепях, электрическая дуга, искрение и неисправности оборудования.

Согласно [23], пожарная профилактика обеспечивается: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями. К мерам предотвращения пожара относятся: применение средств защитного отключения возможных источников загорания (защитного зануления); применение искробезопасного

оборудования; применение устройства молниезащиты здания; выполнение правил (инструкций) по пожарной безопасности.

Помещение имеет пожароопасную зону класса П-2а. Минимальная допустимая степень защиты оболочек электрических машин для данной пожароопасной зоны обозначается IP44. Использование данной степени защиты – одно из направлений профилактики, оно должно быть установлено на объектах, где воздействие опасных факторов пожара может привести к травматизму или гибели людей, этого требует «технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

Проектируемое помещение оснащено такой системой с дымовыми извещателями. Сигналы извещателей включают систему протоколирования информации, формируют управляющую систему тревоги и систему оповещения о пожаре, для своевременной эвакуации людей. Это другое направление профилактики загораний.

Выбор типа и расчет необходимого числа огнетушителей производится в зависимости от их огнетушащей способности. Из пяти таких классов, лаборатории подходит класс А (пожар твердых веществ) и класс Е (горение электроустановок). Согласно [23] на 800 м² защищаемой площади рекомендуется использовать восемь двухкилограммовых порошковых огнетушителей.

При обнаружении загорания рабочий немедленно сообщает по телефонам 01, 101, 112 в пожарную охрану, сообщает руководителю, приступают к эвакуации людей и материальных ценностей. Тушение пожара организуется первичными средствами с момента обнаружения пожара. Пострадавшим при пожаре обеспечивается скорая медицинская помощь

Заключение

В данной работе было выполнено проектирование вторичной системы электропитания, источником которой является трехфазный автономный инвертор напряжения по схеме Скотта.

Произведен полный расчет элементов схемы инвертора и разработана система управления и защиты с учетом особенностей работы трансформаторной схемы Скота.

Расчет позволил определить следующие данные:

- Номинальный ток фазы нагрузки $I_n = 22,2 \text{ A}$;
- Габаритная мощность трансформаторов $P_r = 915,682 \text{ Вт}$;
- Число витков на первичной стороне трансформаторов $w_1 = 29$ витков;
- Число витков на вторичной стороне однообмоточного трансформатора $w_2 = 71$ виток;
- Число витков на вторичной стороне двухобмоточного трансформатора $w_2' = 82$ витка;
- Максимальное значение тока силовых ключей и вентилях АИН 1
 $I_{VT/VD\max} = 49,2 \text{ A}$
- Максимальное значение тока силовых ключей и вентилях АИН 2
 $I_{VT/VD\max} = 24,6 \text{ A}$

В специальной части было проведено моделирование преобразователя в программных продуктах MatLab Simulink и Multisim, по результатам которого было выявлено, что данные, полученные при проектировании практически полностью совпадают с результатами моделирования.

В разделе «Финансовый менеджмент» была проведена оценка эффективности научного исследования, определение перспективности, выявлены основные сильные и слабые стороны проекта, продуман план действий при возникновении кризисной ситуации. Также рассчитан полный

бюджет затрат НТИ, из чего можно сделать вывод о привлекательности проекта с финансовой точки зрения.

В разделе «Социальная ответственность» был проведен анализ вредных и опасных факторов, возникающих в процессе разработки и сборки автономного трехфазного инвертора по схеме Скотта. Рассмотренные вопросы техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и предложенные меры по снижению воздействия возможных факторов производственной среды позволили спроектировать помещение для комфортной и, главное, безопасной работы сотрудников. В рамках предприятия должны быть осуществлены вышеописанные требования и мероприятия по строгому регламенту.

Список использованных источников

- 1 ГОСТ Р 54073-2017 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. -М: Стандартинформ, 2018. – 39 с.
- 2 Власов Г. Д. Проектирование систем электроснабжения летательных аппаратов. – М: Машиностроение, 1967. – 407 с.
- 3 Зонтов В. М., Куприн Б. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – М: ВВИА им. Жуковского, 1988. – 390 с.
- 4 Коняхин С. Ф., Коняхин В. С., Аверин С. В. Схема Скотта в бортовых трехфазных преобразователях электроэнергии // Практическая силовая электроника №3 (51) - 2013 - С. 2-10.
- 5 Мишуров В. С. Устройства преобразовательной техники: Методические указания по выполнению курсового проекта. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. – 127с
- 6 Марочник металлов: Стальной сплав прецизионный 49КФ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://metallichekiy-portal.ru/marki_metallov/stp/49KF
- 7 Технические справочник по кабелям и проводам. ПНЭТ-имид – провод обмоточный с эмалевой изоляцией. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ruscable.ru/info/wire/mark/pnet-imid/>
- 8 Петрович В. П., Воронина Н. А., Глазачев А. В. Силовые преобразователи электрической энергии: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского Политехнического Университета, 2009. – 240 с.
- 9 Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. – М: Издательский дом «Додэка-XXI», 2001. – 384 с.
- 10 Каталог электронных компонентов Компэл. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.compel.ru/>

- 11 Розанов Ю. К. Основы силовой электроники. – М: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
- 12 Видяев И. Г., Серикова Г. Н., Гаврикова Н. А. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014 – 73 с.
- 13 Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018)
- 14 ГОСТ 12.2.033-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ стоя. Общие эргономические требования.
- 15 ГОСТ 12.0.003-2015. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
- 16 СП 60.13330.2016 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.
- 17 СП 51.13330.2011. Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003
- 18 СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95
- 19 ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
- 20 СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
- 21 Постановление Администрации г. Томска от 11.11.2009 г. №1110 (с изменениями от 24.12.2014)
- 22 Постановлением Правительства РФ от 03.09.2010 №681
- 23 Федеральный закон от 22.07.2013 г. №123 – ФЗ, Технический регламент о требованиях пожарной безопасности.